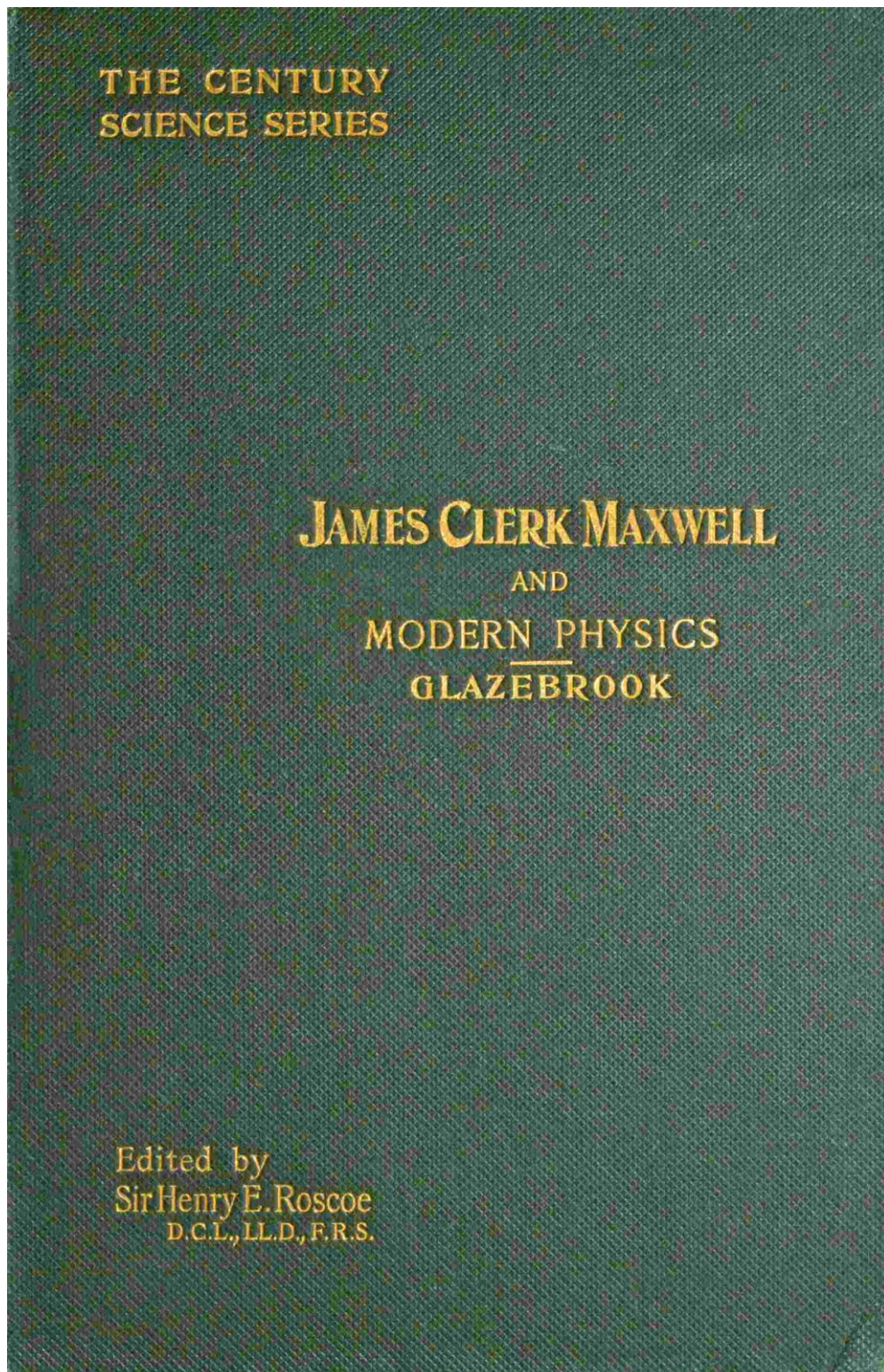


Джеймс Клерк Максвелл и современная физика

Ричард Глейзбрук



Электронная книга проекта "Гутенберг" Джеймса Клерка Максвелла и современная физика

Эта электронная книга предназначена для использования любым человеком в любой точке Соединенных Штатов и большинства других частей мира бесплатно и практически без каких-либо ограничений. Вы можете скопировать его, раздать или повторно использовать в соответствии с условиями лицензии Project Gutenberg, прилагаемой к этой книге, или онлайн по адресу www.gutenberg.org. Если вы находитесь за пределами Соединенных Штатов, вам необходимо ознакомиться с законами страны, в которой вы находитесь, прежде чем использовать эту электронную книгу.

Название: Джеймс Клерк Максвелл и современная физика

Автор: Ричард Глейзбрук

Дата выхода: 16 мая 2021 г. [Электронная книга № 65359]

Последнее обновление: 18 октября 2024 г.

Язык: Английский

Кредиты: Электронный текст подготовлен Фэй Данн, Чарли Ховардом и командой онлайн-корректоров (<https://www.pgdp.net>) на основе изображений страниц, щедро предоставленных Internet Archive (<https://archive.org>)

*** НАЧАЛО ПРОЕКТА ЭЛЕКТРОННОЙ КНИГИ ГУТЕНБЕРГА "ДЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА" ***

Электронная книга проекта "Гутенберг", Джеймс Клерк Максвелл и современная физика, Ричард Глейзбрук

Примечание: Изображения оригинальных страниц доступны через интернет-архив. См. <https://archive.org/details/jamesclerkmaxwel00glaziala>

Примечание переписчика

Увеличенные версии большинства иллюстраций можно просмотреть, щелкнув по ним правой кнопкой мыши и выбрав опцию для просмотра их отдельно или дважды нажав и / или растянув их.

СЕРИЯ " НАУКА ВЕКА "

Под редакцией СЭРА Генри Э. РОСКО, доктора юридических наук, F.R.S.

ДЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

Серия "Наука века".

ПОД РЕДАКЦИЕЙ СЭРА Генри Э. РОСКО, Д.К.Л., Ф.Р.С., М.П.

Джон Далтон и расцвет современной химии.

Сэр Генри Э. Роско, Ф.Р.С.

Майор Реннелл, Ф.Р.С., и расцвет английской географии.

Автор: Клементс Р. Маркхэм, К.Б.н., Ф.Р.С., президент Королевского географического общества.

Юстус фон Либих: его жизнь и творчество (1803-1873).

Автор: У. А. Шенстоун, профессор химии в Клифтонском колледже.

Гершели и современная астрономия.

Автор: Агнес М. Клерк, автор книги "Популярная история астрономии 19 века" и др.

Чарльз Лайель и современная геология.

Преподобный профессор Т. Г. Бонни, Ф.Р.С.

Джеймс Клерк Максвелл и современная физика.

Автор: Р. Т. Глейзбрук, член Королевского совета, Тринити-колледж, Кембридж.

В стадии подготовки.

Майкл Фарадей: его жизнь и творчество.

Профессор Сильванус П. Томпсон, F.R.S.

Хамфри Дэви.

Автор: Т. Э. Торп, Федеральный инспектор, главный химик правительственных лабораторий.

Пастер: его жизнь и творчество.

Автор: М. Арманд Раффер, доктор медицинских наук, директор Британского института профилактической медицины.

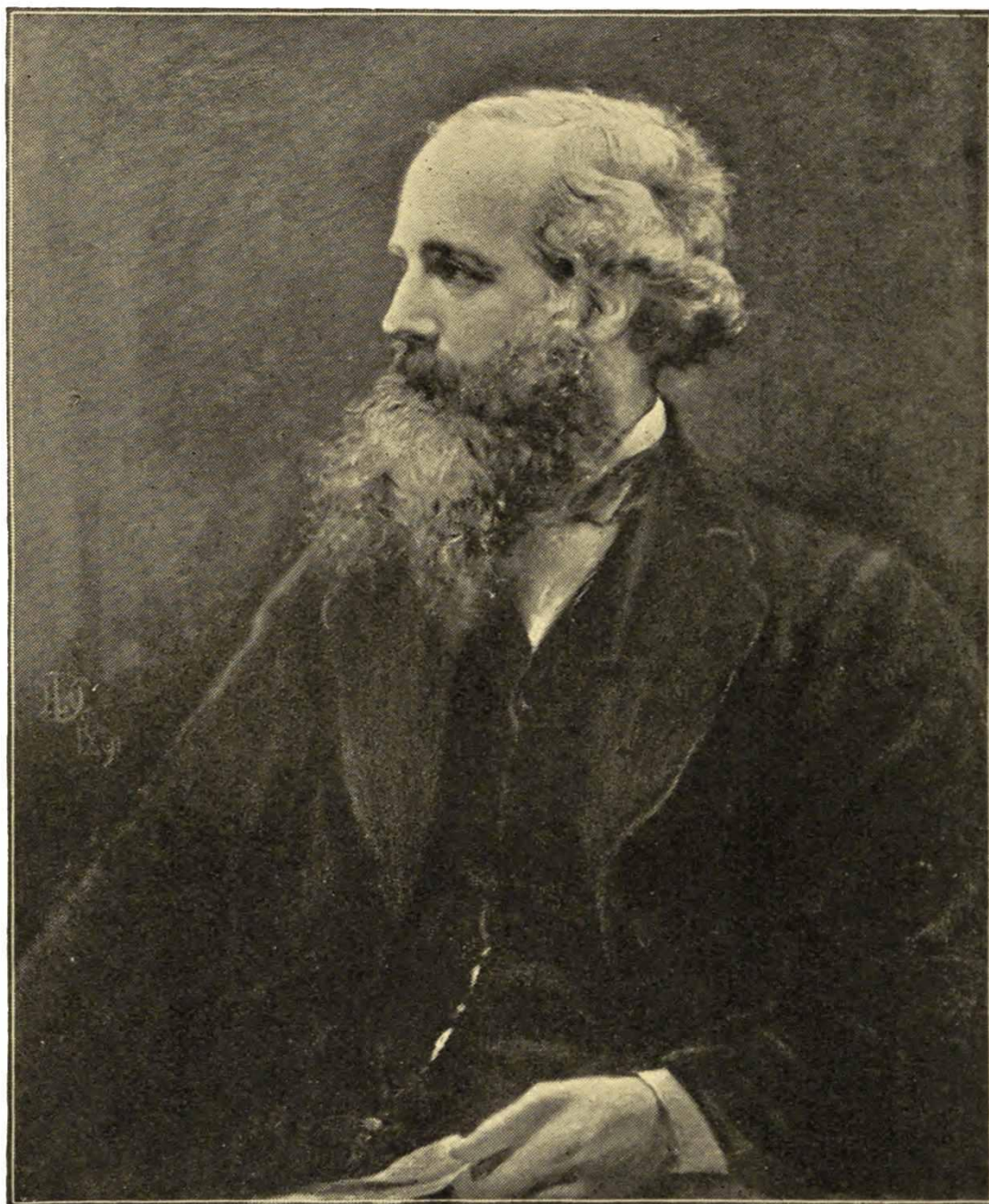
Чарльз Дарвин и происхождение видов.

Автор: Эдвард Б. Поултон, магистр, профессор зоологии Оксфордского университета.

Hermann von Helmholtz.

Автор: А. В. Рюкер, Ф.Р.С., профессор физики Королевского колледжа естественных наук в Лондоне.

CASSELL & COMPANY, Limited, *Лондон; Париж и Мельбурн.*



J. Clerk Maxwell

Дж. Клерк Максвелл

(С фотографии картины Г. Лоуза Дикинсона, эскайра, в холле Тринити-колледжа, Кембридж.)

СЕРИЯ " НАУКА ВЕКА "

Джеймс Клерк Максвелл И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

Р. Т. ГЛЕЙЗБРУК, Ф.Р.С.

*Преподаватель математики в Тринити-колледже Кембриджского
университета и помощник директора
Кавендишской лаборатории*

КАССЕЛЛ и КОМПАНИЯ с ограниченной ответственностью
ЛОНДОН, ПАРИЖ И МЕЛЬБУРН
1896

Все права защищены



ПРЕДИСЛОВИЕ.

Задача дать некоторый отчет о работе Максвелла - описать ту роль, которую он сыграл в развитии физической науки во второй половине девятнадцатого века, — оказалась нелегким трудом. Проблемы, на которые он напал, такого масштаба и сложности, что попытка удовлетворительно объяснить их и их важность без помощи символов почти заранее обречена на провал. Однако попытка была предпринята в надежде, что есть много людей, которые, хотя и не могут следовать математическому анализу работ Максвелла, обладают достаточными общими знаниями о физических идеях и принципах, чтобы составить представление о Максвелле и развитии открытых им истин, представляющих интеллектуальный интерес.

Жизнь Максвелла была написана в 1882 году двумя из тех, кто был наиболее тесно связан с ним, профессором Льюисом Кэмпбеллом и доктором Гарнеттом. Многие биографические подробности предыдущей части этой книги взяты из их работ. Я выражаю благодарность им и их издателям, господам Дж. Макмиллан, за разрешение использовать любое из писем, которые фигурируют в их биографии. Я надеюсь, что моего краткого рассказа может быть достаточно, чтобы побудить многих прочитать “Жизнь и письма” профессора Кэмпбелла с целью узнать больше о сокровенных мыслях человека, который оставил такой сильный отпечаток во всех своих начинаниях и был так глубоко любим всеми, кто его знал.

R. T. G.

*Кембридж,
декабрь 1895 г.*

Содержание.

Глава	СТРАНИЦА
I. Ранняя жизнь	9
II. Студенческая жизнь в Кембридже	28
III. Ранние исследования — профессор в Абердине	38
IV. Профессор Королевского колледжа в Лондоне—Жизнь в Гленлере	54
V. Кембридж—профессор физики	60
VI. Кембридж—Кавендишская лаборатория	73
VII. Научная работа—Цветовое зрение	93
VIII. Научная работа—молекулярная теория	108

IX.	Научная работа—Электрические теории	148
X.	Развитие теории Максвелла	202

Джеймс Клерк Максвелл И СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

ГЛАВА I. РАННЯЯ ЖИЗНЬ.

“Тот, кто обогатил наследие, оставленное Ньютоном, и укрепил работу Фарадея, тот, кто подтолкнул умы Кембриджа к новому курсу реальных исследований, явно заслужил свое место в памяти человечества”. Именно так профессор Льюис Кэмпбелл и мистер Гарнетт начали в 1882 году свою жизнь Джеймса Клерка Максвелла. Все годы, прошедшие с той даты, имели тенденцию укреплять веру в величие работ Максвелла и в плодотворность его гения, который вдохновлял на труды тех, кто не только в Кембридже, но и во всем мире помогал возвращать семена, посеянные им. Моей целью на следующих страницах будет дать очень краткий отчет о его жизни и трудах в форме, которая, я надеюсь, позволит многим осознать, чем Физическая наука обязана тому, кто был для меня самым добрым другом, а также уважаемым учителем.

Клерки Пеникуика, от которых происходил клерк Максвелл, были знатной семьей. Сэр Джон Клерк, прапрадед клерка Максвелла, был бароном казначейства Шотландии с 1707 по 1755 год; он также был одним из уполномоченных Союза и во многих отношениях выдающимся ученым. Его второй сын Джордж женился на двоюродной сестре Доротее Максвелл, наследнице Миддлби в Дамфришире, и взял фамилию Максвелл. После смерти своего старшего брата Джеймса в 1782 году Джордж Клерк Максвелл унаследовал титул баронета и собственность Пеникуик. До этого времени он был вовлечен в спекуляции с добычей полезных ископаемых и производством, и большая часть собственности Среднего класса была продана, чтобы расплатиться с его долгами.

Собственность сэра Джорджа Клерка Максвелла перешла в 1798 году к двум его внукам, сэру Джорджу Клерку и мистеру Джону Клерку Максвеллу. Было условлено, что младший из них должен был завладеть остатками собственности Миддлби и принять вместе с ней фамилию Максвелл. Сэр Джордж Клерк был членом парламента от Мидлотиана и занимал этот пост при сэре Роберте Пиле. Джон Клерк Максвелл был отцом Джеймса Клерка Максвелла, героя этого очерка.¹

Джон Клерк Максвелл жил со своей овдовевшей матерью в Эдинбурге до ее смерти в 1824 году. Он был юристом и время от времени вел небольшие дела в судах. В то же время он сохранял интерес к научным занятиям, особенно практического характера. Профессор Кэмпбелл рассказывает нам о попытке изобрести мехи, которые давали бы непрерывную тягу воздуха. В 1831 году он опубликовал в *Эдинбургском медицинском и философском журнале* статью,

озаглавленную “Наброски плана объединения машинного оборудования с ручным печатным станком”.

В 1826 году Джон Клерк Максвелл женился на мисс Фрэнсис Кей из Норт-Чарлтона, Нортумберленд. Первые несколько лет их супружеской жизни их домом был Эдинбург. Старое поместье Миддлби сильно сократилось, и на нем не было ни одного дома, в котором мог бы жить лэрд. Однако вскоре после женитьбы Джон Клерк Максвелл приобрел прилегающий участок в Гленлере и построил особняк для себя и своей жены. Мистер Максвелл руководил строительными работами. Фактические рабочие планы по некоторым дальнейшим пристройкам, сделанные в 1843 году, были делом его рук. Был разбит и засажен сад, и унылая каменистая пустошь была превращена в приятный дом. В течение нескольких лет после того, как он поселился в Гленлере, дом в Эдинбурге принадлежал мистеру Максвеллу, и здесь 13 июня 1831 года родился его единственный сын, Джеймс Клерк Максвелл. Дочь, родившаяся ранее, умерла в младенчестве. Однако Гленлер был домом его родителей, и почти все воспоминания, которые у нас есть о его детстве, связаны с ним. Лэрд посвятил себя своим поместьям и образованию сына, принимая, однако, время от времени полную долю участия в тех делах графства, которые выпадали на его долю. Гленлер в 1830 году был по большей части в глуши; путешествие из Эдинбурга занимало два дня. “Экипажи в современном понимании этого слова были едва ли известны в долине Урр. Что-то вроде двухместной двуколки с капюшоном былолучшим извинением за передвижение в карете, а самым активным способом передвижения была грубая собачья повозка, известная в семейном наречии как харли”.²

Миссис Максвелл пишет так³, когда мальчику было почти три года, своей сестре, мисс Джейн Кей:

“Он очень счастливый человек, и ему значительно стало лучше с тех пор, как погода стала умеренной. Он великолепно работает с дверями, замками, ключами и т.д., и “Покажи мне, как это делается’ никогда не сходит у него с языка. Он также исследует скрытое русло ручьев и колокольных проводов — то, как вода попадает из пруда через стену и навес или небольшой мостик и спускается по водостоку в Уотер-Орр, затем мимо смидди и вниз к морю, где плавают корабли Мэгги. Что касается колокольчиков, то они не заржавеют; он стоит на страже на кухне, а Мэг бегают по дому и звонит во все колокольчики по очереди, или он звонит и посылает Бесси посмотреть и крикнуть, чтобы дать ему знать; и он повсюду таскает папу, чтобы показать ему отверстия, через которые проходят провода”.

Таким образом, его ранней целью было выяснить, “как это происходит”. Его двоюродная сестра, миссис Блэкберн, рассказывает нам, что на протяжении всего детства его постоянным вопросом было: “Что это за штука? Что она делает?” И если ответ был слишком расплывчатым или неубедительным, он добавлял: “Но в чемособенность этого?”

Наиболее интересный рассказ профессора Кэмпбелла об этих ранних годах иллюстрируется рядом набросков эпизодов его жизни. На одной Максвелл поглощен наблюдением за скрипачом на деревенских танцах; на другой он учит свою собаку некоторым трюкам; на третьей он помогает маленькому мальчику строить замок. Вместе со своей кузиной мисс Уэддерберн он изобрел несколько фигурок для игрушки, известной как волшебный диск, которая впоследствии превратилась в зоотроп, или колесо жизни, и в которой с помощью хитроумного устройства из зеркал создавалось впечатление непрерывного движения.

Эта счастливая жизнь продолжалась до смерти его матери в декабре 1839 года; она умерла в возрасте сорока восьми лет от мучительной болезни, от которой впоследствии скончался ее сын. Когда Джеймсу, которому тогда было восемь лет, сказали, что она теперь на небесах, он сказал: “О, я так рад! Теперь у нее больше не будет боли”.

После этого его тетя, мисс Джейн Кей, заняла место матери. Пришлось столкнуться с проблемой его образования, и первые попытки не увенчались успехом. Во время последней болезни миссис Максвелл был нанят репетитор, и он, по-видимому, пытался принудить клерка Максвелла к обучению; но такое лечение не помогло, и в 1841 году, когда ему было десять лет, он начал свою школьную жизнь в Эдинбургской академии.

Поначалу школьная жизнь была полна трудностей. Появление Максвелла в первый день в школе в домашних туфлях Galloway с квадратным носком и пряжками было больше, чем могли вынести его товарищи. “Кто сделал эти туфли?” они спросили⁴; и ответ, который они получили, был—

- Ты знаешь, что это был мужчина,

И он жил в доме,

В то время я был мышью”.

В тот день, по словам профессора Кэмпбелла, он вернулся на Хериот—роу, “в лохмотьях туники и без юбки, аккуратная оборка помята и порвана, - сам он был чрезвычайно доволен своим опытом и не выказывал ни малейших признаков раздражения”.

Дом № 31 по Хериот-роу был домом его овдовевшей тети, миссис Уэддерберн, сестры мистера Максвелла; и это место, с редкими перерывами, когда он гостил у мисс Кей, было его домом в течение следующих восьми или девяти лет. Сам мистер Максвелл в этот период проводил большую часть своего времени в Эдинбурге, большую часть зимы живя со своей сестрой и возвращаясь в Гленлер на весну и лето.

Многое из того, что мы знаем о жизни клерка Максвелла в этот период, почерпнуто из писем, которыми он обменивался с отцом. Они рассказывают нам о тесной близости и привязанности, которые существовали между ними, о страстном желании мальчика угодить отцу и развлечь его в унылом одиночестве Гленлера, а также о тревоге отца за его благополучие и прогресс.

Профессор Кэмпбелл был его школьным товарищем и описывает события тех лет, в которых он участвовал, которые ясно показывают нам, каким был клерк Максвелл. Таким образом, он пишет⁵:—

Он познакомился со Свифтом и Драйденом, а через некоторое время с Гоббсом и “Худибрами” Батлера. Затем, если его отец был в Эдинбурге, они вместе гуляли, особенно в субботу, в перерыве между каникулами, и ‘смотрели’ на Лейт-форт, или на подготовку к строительству железной дороги Грантон, или на расслоение Солсберийских скал — всегда узнавали что-то новое и находили идеи для развития воображения. Однажды в субботу, 12 февраля 1842 года, он получил особое удовольствие, его повели “посмотреть на электромагнитные машины”.

И снова, говоря о его школьной жизни: -

Но и в школе он постепенно добивался своего. Вскоре он обнаружил, что латынь стоит изучать, и греческий *Delectus* заинтересовал его, когда мы зашли так далеко. И были два предмета, по которым он сразу же занял первое место, когда у него был для этого достаточный шанс; это были Биография Священных Писаний и английский язык. Сравнительная неготовность к арифметике, так же как и к латыни, сдерживала его.

В целом он достиг определенного успеха, который помог ему завоевать определенное уважение; и каким бы странным он иногда ни казался своим товарищам, он обладал тремя качествами, которые они не могли не понимать, — гибкой силой конечностей, невозмутимой храбростью и глубоким добродушием. Профессор Джеймс Мьюирхед вспоминает его как "дружелюбного мальчика, хотя он никогда полностью не сливался с остальными". А другой старый однокурсник, преподобный У. Макфарлейн из Лензи, описывает следующее свое впечатление: 'Клерк Максвелл, когда поступил в Академию, был несколько простоват и несколько эксцентричен. Мальчишки называли его "Дафти" и пытались подшутить над ним. Помню, однажды он с огромной энергией, с какой-то демонической силой набросился на своих мучителей. Я думаю, после этого его оставили в покое, и он постепенно завоевал уважение даже самых легкомысленных из своих школьных товарищей".

Первое упоминание о математических исследованиях встречается, по словам профессора Кэмпбелла, в письме своему отцу, написанном вскоре после его тринадцатилетия.⁶

После описания виргинских менестрелей и в перерывах между расспросами о различных питомцах в Гленлере он замечает, как будто это обычная новость: "Я сделал тетраэдр, додекаэдр и еще два хедрона, названий которых я не знаю". Мы еще не начинали геометрию, и он, конечно, в то время не выучил определения из Евклида; тем не менее, он не просто осознал природу пяти правильных тел в достаточной степени, чтобы построить их из картона с приблизительной точностью, но и продвинулся дальше. на их основе были созданы другие симметричные многогранники, образцы которых (усовершенствованные в 1848 году) до сих пор можно увидеть в Кавендишской лаборатории.

Кто первым обратил его внимание на пирамиду, куб и т.д., я не знаю. Возможно, он случайно прочитал о них в книге. Но факт остается фактом: в то раннее время его воображение, как и воображение древнегреческих геометров, было захвачено этими типами полной симметрии; и его воображение настолько полностью овладело ими, что он приступил к созданию их собственными руками. То, что он сам придавал этому моменту большее значение, чем указано в письме, подтверждается тщательностью, с которой он сохранил эти скоропортящиеся вещи, так что они (или те, что заменили их в 1848 году) все еще существуют по прошествии тридцати семи лет".

Летние каникулы он провел в Гленлере. Его двоюродная сестра, мисс Джемайма Уэддерберн, была с ним и участвовала в его игре. Ее искусный карандаш оставил нам множество забавных снимков того времени, некоторые из которых воспроизведены профессором Кэмпбеллом. Устраивались всевозможные экспедиции и пикники, а новая игрушка, известная как "дьявол на двух палочках", доставляла бесконечное удовольствие. Зимние каникулы он обычно проводил в Пенкиуике, а иногда и в Глазго, с профессором Блэкберном или профессором У. Томсоном (ныне лордом Кельвином). В октябре 1844 года Максвелл был переведен в ректорскую

аудиторию. Джон Уильямс, впоследствии архидьякон Кардигана, выдающийся человек из Балиола, был настоятелем, и это изменение было во многих отношениях важным для Максвелла. Он пишет своему отцу: “П... мне нравится больше, чем Б.... У нас много шуток, и он много говорит, и у нас не так много монотонного разбора. На английском языке Мильтон лучше, чем История Греции....”

П - так мальчики называли ректора; Б - мистера Кармайкла, второго учителя. Это ⁷ — отчет о первом интервью Максвелла с ректором: -

Ректор: “Из какой части Галлоуэя вы родом?”

Дж. К. М.: “Из долины Урр. Пишется это о, эрр, эрр или оо, эрр, эрр.

Было начато изучение геометрии, и в лице учителя математики мистера Глоага Максвелл нашел учителя с настоящим талантом справляться со своей задачей. Именно здесь сразу проявилось огромное превосходство Максвелла над многими его товарищами. “Казалось, - говорит профессор Кэмпбелл, - что он был в центре предмета, когда они были только на границе; но мальчишеская игра в состязание пункт за пунктом с таким умом была самым благотворным стимулом, так что само проявление способностей доставляло чистую радость. У Максвелла первые уроки геометрии сразу же переросли в исследования, которые стали плодотворными”.

В июле 1845 года он пишет:

“Я получил 11-ю премию за стипендию, 1-ю премию по английскому языку, премию за английские стихи и математическую медаль. Я старался на знание Священных Писаний, и Хэмилтон, занявший 7-е место, добился этого. В четверг мы боролись за медаль. Я выполнил их все и вернулся домой в половине третьего, но Кэмпбелл оставался до четырех. Я порядком устал, выполняя письменные упражнения с девяти до половины третьего.

Сегодня в Портобелло мы с Кэмпбеллом “еще раз сходили на пляж”. Теперь я немного умею плавать. Кэмпбелл получил 6 призов. Он слишком рано написал письмо, поздравляющее его с моей медалью; но между нами нет соперничества, как говорит Б. Кармайкл”.

После лета, проведенного в основном в Гленлере, он вернулся со своим отцом на зиму в Эдинбург и в возрасте четырнадцати лет начал посещать собрания Эдинбургского королевского общества. В Обществе искусств он познакомился с мистером Р. Д. Хэем, художником-декоратором, который заинтересовался попыткой свести красоту формы и цвета к математическим принципам. Клерк Максвелл заинтересовался вопросом, как нарисовать идеальный овал, и разработал метод рисования овальных кривых, который был передан его отцом профессору Форбсу за его критику и предложения. Обсудив этот вопрос с профессором Келландом, профессор Форбс написал следующее⁸:—

“Мой дорогой сэр, я рад узнать сегодня от профессора Келланда, что его мнение о статье вашего сына совпадает с моим, а именно, что это наиболее остроумно, делает ему большую честь и, как мы полагаем, представляет собой новый способ рассмотрения более высоких кривых применительно к фокусам. К сожалению, эти овалы кажутся кривыми очень высокого и трудноразрешимого порядка, так что, возможно, элегантный метод описания не приведет к соответствующей простоте в исследовании их свойств. Но сейчас не об этом. Если вы

пожелаете, я думаю, что простота и элегантность метода дали бы право представить его на рассмотрение Королевского общества.—Поверьте мне, мой дорогой сэра, искренне ваш,
“Джеймс Д. Форбс”.

Вследствие этого первая опубликованная статья клерка Максвелла была передана Королевскому обществу Эдинбурга 6 апреля 1846 года, когда ее автору едва исполнилось пятнадцать. Его название следующее: “К описанию овальных кривых и кривых, имеющих множество фокусов”. Автор - мистер Клерк Максвелл-младший. С замечаниями профессора Форбса. Передано профессором Форбсом”.

Запись в дневнике его отца гласит: “М. 6 [Ап., 1846.] Королевское общество с Jas. Профессор Форбс дал одобрение. из "Овалов Джеймса". Встречен очень большим вниманием и одобрением в целом ”.

Это стало началом дружбы между Максвеллом и Forbes на всю жизнь.

Кривые, исследованные Максвеллом, обладают тем свойством, что сумма, полученная путем добавления к расстоянию любой точки на кривой от одного фокуса постоянной величины, кратной расстоянию той же точки от второго фокуса, всегда постоянна.

Кривые имеют большое значение в теории света, поскольку, если этот постоянный коэффициент выражает показатель преломления любой среды, то свет, расходящийся из одного фокуса без среды и преломляющийся на поверхности, ограничивающей среду и имеющей форму одного из овалов Максвелла, будет преломляться так, чтобы сходиться ко второму фокусу.

Примерно в то же время он был занят некоторыми исследованиями свойств желе и гуттаперчи, которые, по-видимому, были предложены “Теорией ледников” Форбса.

Ему не удалось получить математическую медаль в 1846 году — возможно, из—за этих исследований, - но он продолжал учиться в школе до 1847 года, когда ушел, будучи тогда первым по математике и английскому языку и почти первым по латыни.

В 1847 году он работал над магнетизмом и поляризацией света. Где-то в том же году его дядя, мистер Джон Кей, повел его к Уильяму Николу, изобретателю поляризационной призмы, который показал ему цвета, проявляемые поляризованным светом после прохождения через необожженное стекло. По возвращении он изготовил полярископ со стеклянным отражателем. Каркас первого прибора был из картона, но впоследствии из дерева было изготовлено более совершенное изделие. Маленькие линзы, закрепленные на картоне, использовались, когда требовался конический карандаш. С помощью этого прибора он исследовал фигуры, изображенные на кусках необожженного стекла, которые он изготовил сам; и с помощью камеры lucida и коробки с красками он воспроизвел эти фигуры на бумаге, стараясь не набрасывать контуров, а незаметно оттенять каждую цветную полосу следующей. Некоторые из этих цветных рисунков он переслал Николь и был более чем вознагражден, получив вскоре после этого пару призм, изготовленных самим Николь. Максвелл всегда очень высоко ценил эти призмы. Однажды, когда он учился в Тринити, маленькая коробочка с ними была унесена его постельницей во время каникул и обречена на уничтожение. Постельница умерла до начала семестра, и призмы были найдены только в результате тщательных поисков среди ее вещей.⁹

После этого их охраняли более тщательно, и сейчас они находятся вместе с деревянным полярископом, кусочками необожженного стекла и акварельными рисунками в одной из витрин Кавендишской лаборатории.

Примерно в это же время профессор П. Г. Тейт и он были школьными товарищами по Академии, признанными двумя лучшими математиками в школе. Профессор Кэмпбелл говорит, что было сочтено желательным, чтобы “у нас были уроки физики, поэтому один из классических мастеров давал их по учебнику.... Единственное, что я отчетливо помню об этих часах, - это то, что Максвелл и П. Г. Тейт, казалось, знали об этом предмете гораздо больше, чем наш учитель ”.

Интересный отчет о тех днях дает профессор Тейт в некрологе о Максвелле, напечатанном в “Трудах Королевского общества Эдинбурга, 1879-80”, из которого взято следующее:

- Когда я впервые познакомился с клерком Максвеллом, около тридцати пяти лет назад, в Эдинбургской академии, он был на год старше меня и учился в пятом классе, а я в четвертом.

“В школе его сначала считали застенчивым и довольно скучным. У него не было друзей, и он проводил свои редкие каникулы за чтением старых баллад, рисованием любопытных диаграмм и изготовлением грубых механических моделей. Эта поглощенность подобными занятиями, совершенно непонятными его школьным товарищам (которые тогда были совершенно несведущи в математике), конечно, принесла ему не очень лестное прозвище, которое, я знаю, до сих пор помнят многие члены этого Общества. Однако примерно в середине своей школьной карьеры он удивил своих товарищей тем, что внезапно стал одним из самых блестящих среди них, получая высокие, а иногда и самые высокие призы за стипендии, математику и сочинение стихов на английском языке. С этого времени я очень сблизился с ним, и мы со школьным энтузиазмом обсуждали вместе многочисленные любопытные проблемы, среди которых мне особенно запомнились различные плоские сечения кольца или тора и форма цилиндрического зеркала, которое должно показывать человеку его собственное изображение в ненвернутом виде. У меня до сих пор хранятся некоторые рукописи. мы обменялись ими в 1846 году и в начале 1847 года. Работы Максвелла посвящены ‘Коническому маятнику’, ‘Овалам Декарта’, ‘Мелюидным и апиюидным’ и ‘Трифокальным кривым’. Все они составлены в строгой геометрической форме и разделены на последовательные предложения. Последние три связаны с его первой опубликованной статьей, переданной Форбсом этому обществу и напечатанной в наших ‘Трудах’, том ii., под названием ‘Об описании овальных кривых и кривых, имеющих множество фокусов’ (1846). В то время, когда были написаны эти статьи, он не получил никаких знаний по математике, кроме нескольких книг Евклида и элементарных основ алгебры ”.

В ноябре 1847 года клерк Максвелл поступил в Эдинбургский университет, изучая математику у Келланда, натурфилософию у Дж. Д. Форбса и логику у сэра У. Р. Гамильтона. На данный момент, по словам профессора Кэмпбелла, ¹⁰—

“он все еще вызывал некоторое беспокойство у более общепринятых среди своих друзей оригинальностью и простотой своих поступков. Его ответы в обычной беседе были косвенными и загадочными, часто произносились с запинкой и в монотонной тональности. Несмотря на исключительную опрятность, он испытывал стойкое неприятие тщеславия в виде накрахмаленных перчаток. Он испытывал благочестивый ужас перед уничтожением чего бы то ни было, даже клочка писчей бумаги. В поездках по железной дороге он предпочитал

путешествовать третьим классом, говоря, что ему нравится жесткое сиденье. За столом он часто казался отвлеченным от происходящего, поглощенный наблюдением за эффектом преломления света в очках или каким—нибудь экспериментом со своими глазами - заглядыванием за угол, изготовлением невидимых стереоскопов и тому подобным. Мисс Кей обычно привлекала его внимание, крича: "Джеймси, ты в реквизите". Он никогда не пробовал вина и разговаривал с мягко и просто точно таким же тоном. С другой стороны, его учителя — прежде всего Форбс — составили высочайшее мнение о его интеллектуальной оригинальности и силе; и несколько опытных наблюдателей, наблюдая за его преданностью отцу, начали догадываться о его героической целеустремленности. Его товарищам по колледжу, которых он теперь мог выбирать по своему желанию, его необычный юмор доставлял бесконечное удовольствие. Его главными партнерами после того, как я поступил в Университет Глазго, были мой брат Роберт Кэмпбелл (все еще учившийся в Академии), П. Г. Тейт и Аллан Стюарт. Тейт поступил в Питерхаус, Кембридж, в 1848 году, после одной сессии Эдинбургского университета; Стюарт поступил в тот же колледж в 1849 году; Максвелл поступил туда только в 1850 году”.

За этот период он написал две важные статьи. Одна из них, посвященная “Кривым качения”, была прочитана профессором Келландом в Эдинбургском королевском обществе (“мальчику в круглой куртке не подобало взбираться на трибуну”) в феврале 1849 года; другая, посвященная “Равновесию упругих тел”, появилась весной 1850 года.

Каникулы мы провели в Гленлере, и из писем профессору Кэмпбеллу и другим мы узнаем, как прошло время.

“В субботу, - пишет он ¹¹— 26 апреля 1848 года, сразу по приезде домой, “ натурфилософы взобрались на сиденье Артура с барометром. Профессор установил его на вершине.... Он установил его не прямо, и холм вырос на пятьдесят футов; но мы снова спустили его ”.

В письме от июля того же года он описывает свою лабораторию:—

“Теперь я регулярно устраиваю мастерскую над прачечной у ворот, на чердаке. У меня есть старая дверь, установленная на двух бочках, и два стула, из которых один безопасный, и окно в крыше, над которым можно подниматься и опускаться.

“На двери (или столе) находится множество мисок, кувшинов, тарелок, банок для варенья и т. Д., Содержащих воду, соль, соду, серную кислоту, синий купорос, свинцовую руду; также битое стекло, железная и медная проволока, медные и цинковые пластины, пчелиный воск, сургуч для печати, глину, канифоль, древесный уголь, линзы, гальванический аппарат Сми и бесчисленное множество маленьких жуков, пауков и мокриц, которые попадают в различные жидкости и отравляются. Я намерен применить еще немного гальванизации к свиньям с вареньем; но сначала я должен покрыть медью внутренности свиней, поэтому я экспериментирую с лучшими методами электротипирования. Итак, я делаю медные пломбы с устройством в виде жука. Сначала я подумал, что жук - хороший проводник, поэтому замочил его в воске (совсем не жестоко, потому что я замочил его в кипящей воде, в которой он никогда не лягался), оставив его спинку снаружи; но он не годился. Затем я снял с него слепок из сургуча, вдавил воск в углубление и зачернил его кисточкой; но ни то, ни другое не годилось. Так что, наконец, я взяла пальцы и потерла его, что, на мой взгляд, лучший способ использовать blacklead. Затем он классно покрылся медью. Я расплавляю воск с помощью линзы, поскольку это самый чистый способ получения сильного нагрева, поэтому я делаю с ним большинство вещей, требующих

нагрева. Сегодня я удивил местных следующим образом. Я взял кристалл синего купороса и приложил к нему линзу, и таким образом отогнал воду, оставив белый порошок. Затем я проделал то же самое с небольшим количеством стиральной соды, смешал два белых порошка вместе и слегка намазал их туземным спреем, который за счет взаимного обмена сделал их зелеными, таким образом: -1. Сульфат меди и карбонат соды. 2. Сульфат соды и карбонат меди (синий или зеленый)”.

О своем чтении он говорит: “Я читаю "Эвтерпу" Геродота, заняв очередь, то есть иногда я могу делать реквизит., читать разн. и внутр. Калькулятор, диссертация Пуассона, Гамильтона и т.д.”

В сентябре он занимался поляризованным светом. - Вчера мы были в замке Дуглас и добыли кристаллы селитры, которые я сегодня нарезал пластинками в надежде увидеть кольца.

В июле 1849 года он пишет¹²:—

“Я настроил устройство для демонстрации колец в кристаллах, которое я планировал во время вашего визита в прошлом году. Оно очень хорошо подходит. Я также провел несколько экспериментов со спрессованным желе в качестве иллюстрации моего реквизита. на эту тему. Основной из них был такой: — Желе в горячем виде наливают в кольцевое пространство, заключенное между бумажным цилиндром и пробкой; затем, когда оно остынет, пробку закручивают и желе подвергают воздействию поляризованного света, при этом появляется поперечный крест, х, а не +, с кольцами, равными обратному квадрату радиуса, все это полностью проверяется. Хип! и т.д. *Q.E.D.*”

И снова 22 марта 1850 года:

“В "Практической механике" я превращался в своего рода Дьяволов. Для частных занятий я читал ‘Лекции’ Янга, ‘Принципы механизма’ Уиллиса, ‘Инженерное дело и механику’ Мозли, "Тепло" Диксона и "Оптический отчет" Муаньо. Этот последний представляет собой очень полный анализ всего, что было сделано оптическим способом от Френеля до конца 1849 года, и скоро выйдет еще один том, который завершит эту работу. В ней, помимо обычной оптики, рассказывается о других вещах, сопровождающих свет, таких как тепло, химическое воздействие, фотографические лучи, воздействие на овощи и т.д.

“У меня довольно скудные представления, поскольку я не *рассматриваю* их прямо сейчас. У меня есть представление о кручении проводов и стержней, которое не следует производить до каникул; об экспериментах по действию сжатия на стекло, желе и т. Д., Выполненных численно; о статьях для Физико-математического общества (которое должно всерьез возродиться на следующей сессии!); о соотношениях оптических и механических постоянных, их желательности и т. Д.; О подвесных мостах, цепях и упругих кривых. Алекс. Кэмпбелл, Эгню и я получили задание изучить тему периодических падающих звезд и подготовить список явлений, которые будут наблюдаться 9 августа и 13 ноября. Барометр общества должен занять место Артура в конце сессии, когда выступит Forbes, и все студенты будут приглашены присутствовать, чтобы существование общества было признано ”.

Наконец было решено, что он поедет в кембридж. Тейт пробыл в Питерхаусе два года, в то время как Аллан Стюарт присоединился к нему там в 1849 году, и после долгих обсуждений было решено, что Максвелл поступит в тот же колледж.

Об этом периоде своей жизни Тейт пишет следующее:—

“Зима 1847 года застала нас вместе на занятиях Форбса и Келланда, где он весьма отличился. В первом случае он был особым фаворитом, поскольку ему разрешили свободно использовать классную аппаратуру для оригинальных экспериментов. Он задержался здесь вслед за большинством своих бывших коллег, проведя три года в Эдинбургском университете, работая (без какой-либо помощи или надзора) с физическими и химическими приборами и поглощая всевозможные научные работы в библиотеке. За этот период он написал две ценные статьи, которые опубликованы в наших ‘Трудах’, о ‘Теории кривых качения’ и о ‘Равновесии упругих твердых тел’. Таким образом, осенью 1850 года он привез в Кембридж массу знаний, которые были поистине огромны для столь молодого человека, но находились в состоянии беспорядка, ужасающем его методичного частного наставника. Хотя этим наставником был Уильям Хопкинс, ученик в значительной степени шел своим собственным путем, и можно с уверенностью сказать, что ни один высокопоставленный оратор последних лет не входил в Палату Сената с более несовершенной подготовкой для выполнения ‘оплачиваемой’ работы, чем клерк Максвелл. Но благодаря чистой силе интеллекта, хотя и с минимумом знаний о том, как использовать его с пользой в условиях экзамена, он получил должность Второго Рэнглера и был заключен в скобки наравне со Старшим Рэнглером в более высоком испытании - призах Смита. Его имя значится в Кембриджском ‘Календаре’ как Максвелл из Тринити, но первоначально он поступил в Питерхаус и провел там свой первый семестр, в этом небольшом, но древнейшем учреждении, которое в последнее время обеспечило Шотландию большинством профессоров математики и естественной философии в ее четырех университетах”.

В то время как У. Д. Нивен в своем предисловии к собранию сочинений Максвелла (стр. xii) говорит:—

“Легко можно предположить, что его подготовка к кембриджскому курсу была далека от обычной. Действительно, в течение некоторого времени его план учебы практически не ограничивался, и его уму было позволено следовать своей естественной склонности к науке, хотя и не до такой степени, чтобы отвлекать его от других занятий. Хотя он не был спортсменом — на самом деле, так называемый спорт всегда вызывал у него отвращение, — он все же чрезвычайно любил сельскую жизнь. Он был хорошим наездником и хорошим пловцом. Откуда, однако, он черпал свое главное наслаждение, можно понять из рассказа мистера Кэмпбелла о том, с каким жаром он однажды процитировал строки Бернса, описывающие поэта, обретающего вдохновение, когда он бродил по берегам ручья, свободно предаваясь своим фантазиям. Максвелл был не только любителем поэзии, но и сам поэт, о чем красноречиво свидетельствуют прекрасные произведения, собранные мистером Кэмпбеллом. Однако он видел, что его истинным призванием была наука, и никогда не рассматривал эти поэтические усилия иначе, чем простовремяпрепровождение. Преданность науке, уже подкрепленная успешным начинанием; склонность размышлять над философскими проблемами; и привязанность к английской литературе, особенно к английской поэзии — можно сказать, что эти вкусы, привитые уму исключительной силы и чистоты, были теми дарованиями, с которыми молодой Максвелл начал свою кембриджскую карьеру. Кроме того, его научные познания, как мы можем заключить из его докладов Королевскому обществу Эдинбурга, упомянутых выше, уже были обширными и разнообразными. По словам профессора Тейта, он принес с собой массу знаний, которые были поистине огромны для столь молодого человека, но в состоянии беспорядка, ужасающем для его методичного частного наставника”.

ГЛАВА II. СТУДЕНЧЕСКАЯ ЖИЗНЬ В КЕМБРИДЖЕ.

Максвелл недолго оставался в Питерхаусе; перед окончанием своего первого семестра он перешел в Тринити и поступил к доктору Томпсону 14 декабря 1850 года. Преподавателю он показался застенчивым и неуверенным в себе юношей, но вскоре удивил доктора Томпсона, предъявив пачку документов — вероятно, копии тех, которые он уже опубликовал, — и заметив: “Возможно, это докажет, что я не гожусь для поступления в ваш колледж”.

На перемену настаивали многие друзья, мотивируя свой совет тем, что из-за большого количества высокопоставленных ученых, недавно прибывших в Питерхаус, и небольшого фонда шансы математика получить там стипендию были меньше, чем в Тринити. Это был шаг, о котором он никогда не жалел; перспектива получить Стипендию мало повлияла на его разум. Однако в более крупном колледже он обнаружил более широкие возможности для самосовершенствования, и у него появилась возможность выбирать себе друзей из числа людей, которых он иначе никогда бы не узнал.

Сведения о его студенческой жизни не очень полны; его письма отцу, к сожалению, утеряны, но воспоминаний еще живых друзей у нас достаточно, чтобы представить, на что это было похоже. Сначала он поселился в Кингз-Параде у старого школьного товарища по Эдинбургу К. Х. Робертсона. Он посещал в колледже лекции по математике, хотя они были несколько элементарными, и работал частным учеником у Портера из Питерхауса. Его отец пишет ему в ноябре 1850 года: “Вы навещали профессоров Седжвика в Тринити и Стокса в Пембруке? Если нет, вам следует посетить обоих. Стоукс будет самым подходящим игроком в вашей команде, если он вообще возьмет вас в руки. Седжвик также большой знаток в своей области, и, если бы вы поступили на геологический факультет, был бы очень ценным знакомым.

На втором курсе он стал учеником Хопкинса, великого тренера; он также посещал лекции Стокса, и так началась дружба, которая длилась до самой его смерти. В апреле 1852 года он был избран стипендиатом и получил комнаты в колледже (G, Олд-Корт). В июне 1852 года он достиг совершеннолетия. “Я надеюсь, что ты будешь таким же сдержанным, когда достигнешь совершеннолетия, каким был, когда был младшим”, - пишет его отец накануне. Следующий учебный год, с октября 1852 по июнь 1853 года, был очень напряженным; тяжелая работа в Трипо отнимала у него все время, и он, похоже, был основательно переутомлен. Он заболел, когда гостил недалеко от Лоустофта у преподобного К. Б. Тейлера, дяди его друга по колледжу. Его собственный отчет о болезни приведен в письме профессору Кэмпбеллу¹³ от 14 июля 1853 года.

“Вы написали как раз вовремя, чтобы ваше письмо дошло до меня, когда я добирался до Кембриджа. После экзамена я отправился навестить преподобного К. Б. Тейлера (дядю Тейлера, которого, я думаю, вы видели под именем *Первокурсника* и т.д., автора многих трактатов и других дидактических работ). У нас были небольшие командировки и прогулки, а также приходские,

образовательные и домашние дела. Я намеревался вернуться 18 июня, но 17—го я почувствовал недомогание и принял соответствующие меры, чтобы снова быть здоровым - т.е. лег спать и решил выздороветь. Но это длилось больше двух недель, в течение которых обо мне заботились сверх всяких ожиданий (не то чтобы я раньше многого не ожидал). Когда я была совершенно бесполезна и не могла сидеть, не упав в обморок, мистер Тейлер делал все для меня таким образом, что я не боялась доставить неприятностей. Миссис Тейлер тоже Тейлер; и два племянника делали все, что могли. Таким образом, они все время поддерживали во мне большое счастье и удерживали меня, пока я не смог ходить и не набрался сил. Я вернулся 4 июля.

Следствием всего этого является то, что я переписываюсь с мистером Тейлером и вступил в узы с племянниками, о которых подробнее ниже. С тех пор как я приехал сюда, я посещаю Нор., но, с его одобрения, не начал в полную силу. Однако я продвигаюсь вперед, и работа не давит на подготовленный мозг”.

В этот период он написал несколько статей для *Кембриджского и Дублинского математических журналов*, к которым мы еще вернемся позже. Он также был членом дискуссионного общества, известного как “Апостолы”, и некоторые из написанных им эссе сохранены профессором Кэмпбеллом. Мистер Нивен в своем предисловии к собранию сочинений Максвелла предполагает, что композиция этих эссе заложила основу той литературной отделки, которая является одной из характерных черт научных трудов Максвелла.

Среди его друзей в то время были Тейт, Чарльз Маккензи из Кайуса, миссионерский епископ Центральной Африки, Генри и Фрэнк Маккензи из Тринити, Друп, третий Рэнглер в 1854 году; Гедж, Айзек Тейлор, Блэкистон, Ф. В. Фаррар,¹⁴ Х. М. Батлер,¹⁵ Хорт, В. Лашингтон, Сесил Манро, Г. В. Х. Тейлер и У. Н. Лоусон. Некоторые из тех, кто пережил его, поделились с профессором Кэмпбеллом своими воспоминаниями о тех студенческих днях, которые полны интереса.

Таким образом, мистер Лоусон пишет¹⁶:—

“Должно быть, существует множество его причудливых стихотворений, если до них можно дотянуться, потому что Максвелл постоянно сочинял что-нибудь в этом роде и рассказывал об этом своим друзьям, лукаво посмеиваясь над юмором, который, хотя и принадлежал ему, никому не нравился больше, чем ему самому.

“Я помню, как однажды утром Максвелл пришел ко мне с экземпляром стихов, начинающихся словами “Встреться с телом, летящим по воздуху”, в которых он превратил хорошо известную песню в описание законов соударения твердых тел.

Было также описание, написанное Максвеллом, какой—то университетской церемонии — я забыл, какой, - на которой кто-то “шел впереди”, а кто-то “следовал после”, и “в центре были спорщики, игравшие с символами”.

Эти последние слова, каким бы ни был их смысл, на самом деле были описанием его собственной чудесной силы. Я помню, как однажды на лекции наш лектор трижды заполнял классную доску исследованием какой-то сложной задачи по геометрии в трех измерениях и еще не закончил ее, когда Максвелл задал вопрос, не получится ли это геометрически, и показал, как с помощью фигуры и нескольких линий сразу найти решение.

“Осмелюсь предположить, вы помните, что Максвелл очень любил поговорить практически обо всем. Мы с ним были учениками Хопкинса (на огромном расстоянии друг от друга), и я хорошо помню, как, когда я работал накануне вечером и все утро над "проблемами Хопкинса", практически безрезультатно, Максвелл заходил поболтать и продолжал говорить, в то время как я желал ему убраться подальше, пока, наконец, примерно за полчаса до нашей встречи у Хопкинса, он не говорил: "Что ж, я должен пойти к "проблемам старого Хопкинса""; и к тому времени, когда мы встречались там, все они были закончены.

Я помню, как Хопкинс сказал мне, говоря о Максвелле, незадолго до или сразу после получения степени: “Для этого человека не возможно, чтобы этот человек неправильно мыслил о физических предметах”; а у Хопкинса, как вы знаете, было, пожалуй, больше опыта общения с математическими умами, чем у любого человека его времени”.

Последнее предложение является частью цитаты из дневника, который мистер Лоусон вел в Кембридже, в котором под датой 15 июля 1853 года он пишет:

“Сегодня вечером он (Хопкинс) говорил со мной о Максвелле. Он говорит, что он, несомненно, самый экстраординарный человек, которого он встречал за всю свою жизнь; он говорит, что Максвелл, по-видимому, не может неправильно мыслить о физических предметах; однако в своем анализе он гораздо более несовершенен. Он смотрит на него как на великого гения со всеми его эксцентричностями и пророчествует, что однажды он засияет как светоч в физической науке — пророчество, в котором все его сокурсники энергично объединяются”.

Сколько тех, кто с трудом разбирался в “Электричестве и магнетизме”, осознали истинность замечания о правильности его физических интуиций и временами недостаточности его анализа!

Доктор Батлер, друг тех ранних дней, произнес университетскую проповедь 16 ноября 1879 года, через десять дней после смерти Максвелла, и говорил так:

“Это торжественная вещь — она трогает даже наименее вдумчивых, — когда великий интеллект уходит в безмолвие, и мы его больше не видим. Я уверен, что сегодня многие здесь ощущают такую потерю, такую пустоту. Не часто, даже в этом великом доме мысли и знаний, гаснет столь яркий свет, как тот, который сейчас оплакивают многие прославленные скорбящие, главным образом здесь, но также и далеко за пределами этого места. Мне поверят, если я скажу со всей простотой, что хотел бы, чтобы какому-нибудь более компетентному языку выпало выразить словами те чувства благоговейной привязанности, которые, я убежден, преобладают во многих сердцах в это воскресенье. Моих скудных слов будет немного, но поверьте мне, они идут от сердца. Вы знаете, братья, с какой горячей гордостью мы следим за судьбой тех, кого мы любили и почитали в студенческие годы. Мы можем видеть их, но редко, между нами может быть несколько писем, но их имена никогда не бывают нарицательными. Они никогда не становятся для нас только тем, чем являются другие люди. Когда я пришел в Тринити двадцать восемь лет назад, Джеймс Клерк Максвелл только начинал свой второй курс. Его положение среди нас — я говорю в присутствии многих, кто помнит то время, — было уникальным. Он был единственным признанным гениальным человеком среди студентов старших курсов. Уже тогда мы понимали, что, хотя он едва достиг совершеннолетия, в своей области исследований он был не новичком, а мастером. Его имя уже было знакомо людям науки. Если он выживет, то наверняка станет одним из той маленькой, но священной группы, которой будет дано

расширить границы человеческого знания. Такое положение могло вскружить голову человеку помельче; но друг, которым мы все так гордились и который, казалось, так сказать, так рано связал нас с великим внешним миром пионеров знания, обладал одной из тех богатых и расточительных натур, которые никакое процветание не может обеднить и которые облегчают другим веру в добро. Я часто думал о том, что тем, кто никогда не знал великого старика Адама Седжвика и тогда молодого и вечно юного клерка Максвелла, еще предстояло познать масштаб и полноту форм, по которым создаются некоторые избранные натуры. О научном величии нашего друга большинство из нас не могло судить; но любой мог видеть и восхищаться мальчишеским ликованием, радостным изобретательством, начитанностью, жадной жаждой истины, тонкой мыслью, безупречным характером, неизменным благоговением, исключительным отсутствием какого-либо намека на дыхание мирского в любой из тысяч его форм.

“Братья, возможно, вы знаете таких людей сейчас среди ваших друзей по колледжу, хотя в любой год или даже в любом столетии их может быть очень мало, обладающих редким гением человека, о котором мы сожалеем. Если это так, то, если вы примете совет незнакомца, поблагодарите Бога за Его дар. Поверьте мне, когда я говорю вам, что немногие из таких благословений придут к вам в дальнейшей жизни. Есть благословения, которые приходят раз в жизни. Одним из них является благоговение, с которым мы смотрим на величие и доброту в товарище по колледжу — выше нас, за пределами нашего понимания, далеко за пределами нашего умственного или морального понимания, но все же одним из нас, близком нам, нашем собственном. Вы знаете, по крайней мере частично, что в данном случае обещание юности было более чем выполнено, и что человека, который всего две недели назад был украшением Университета и — не ошибусь ли я, сказав это? — почти первооткрывателем нового мира знаний, любили даже больше, чем им восхищались, сохранив после двадцати лет славы ту веселость, ту простоту, тот детский восторг от всего свежего и чудесного, о которых мы с радостью думаем как о самых верных спутниках истинного научного гения.

Вы также знаете, что он был набожным и вдумчивым христианином. Я не отмечаю это в духе триумфатора-полемиста. Я ни на минуту не стану предполагать, что существует какое-либо естественное противопоставление между научным гением и простой христианской верой. Я не буду сравнивать его с другими, у кого был гений без веры. Христианство, хотя оно с благодарностью приветствует и глубоко ценит их, нуждается сейчас не больше, чем когда святой Павел впервые проповедовал о Кресте в Коринфе, в рассуждениях тонких или мудрости мудрых. Если бы я хотел показать мужчинам, особенно молодым, живую силу Евангелия, я бы отвел их не столько к образованному и набожному христианину, которому знакомы все запасы знаний, сколько в какую-нибудь провинциальную деревню, где на протяжении пятидесяти лет существовали благочестивые традиции и обряды. Там они увидели бы воплощение Евангелия в жизнь; истины, о которых говорили другие люди, увиденными и познанными; дух не от мира сего, зримо присутствующий ежечасно; гражданство на Небесах, ежедневно принимаемое и ежедневно реализуемое. Я считаю, что такие персонажи являются наиболее убедительными проповедниками для тех, кто спрашивает, является ли Откровение басней, а Бог непознаваемым. Да, в большинстве случаев — не во всех, я признаю, — простая вера, даже, возможно, большая, чем благочестивый гений, могущественна для устранения сомнений и насаждения новой убежденности. Но, сказав это, мы вполне можем возблагодарить Бога за то, что наш друг был тем, кем он был, - твердо верующим христианином, и за то, что его могучий ум, путешествовавший по своему желанию через безграничные пространства Творения и почти

касавшийся того, что он называл "краеугольными камнями материальной вселенной", нашел свой истинный покой и счастье в любви и милосердии Того, кого самый смиренный христианин называет своим Отцом. О таком человеке можно с уверенностью сказать, что он получил гражданство на Небесах и что он ожидал как Спасителя Господа Иисуса Христа, через которого были созданы бесчисленные миры и по подобию которого будет создано наше новое духовное тело”.

Tripos поступили в январе 1854 года. “Вам нужно будет купить пирожные для зала заседаний Сената. Возьми свой плед или плед, чтобы укутать ступни”, — таков был совет его отца - совет, который понравится многим, кто помнит здание Сената холодным январским утром.

Максвелл тщательно готовился к этому экзамену. Так, своей тете, мисс Кей, в июне 1853 года он пишет: “Если кто—нибудь спросит, как у меня успехи в математике, скажи, что я занят тем, что устраиваю все так, чтобы иметь возможность выразить все отчетливо, чтобы экзаменатор был доволен сейчас, а ученики получили наставления в будущем. Это приятная работа и очень укрепляющая, но еще не законченная”.

И все же июльская болезнь 1853 года наложила некоторый отпечаток. Профессор Бейнс утверждает, что, войдя в здание Сената за первым докладом, он почувствовал, что в голове у него почти ничего не прояснилось, но постепенно его ментальное видение стало сверхъестественно ясным.

Модераторами были Маккензи из Caius, чьи советы в основном помогли ему переехать в Тринити, штат Вирджиния. Уолтон из Тринити, Уолстенхолм из церкви Христа и Персиваль Фрост из церкви Святого Иоанна.

Когда списки были опубликованы, Раут из Питерхауса был старшим, Максвелл - вторым. Через несколько дней последовал экзамен на призы Смита, и тогда Раут и Максвелл были объявлены равными.

В письме мисс Кэй¹⁷ от 13 января, ожидая список на три дня, он пишет:—

“Все мои корреспонденты писали мне, что очень любезно, и не задавали вопросов, что еще добрее. Итак, я отвечаю вам сейчас, пока я сбавляю скорость, чтобы набрать обороты, оставляя Льюиса, Стюарта и т.д. до следующей недели, когда я дам отчет *опяти днях*. В настоящее время здесь их довольно много, и в целом у нас все очень хорошо; но некоторым нездоровится, и некоторых придется сорвать или проглотить, в зависимости от обстоятельств, а другие так усердно читают, что их не видно. Завтра я иду завтракать с трясущимися людьми, а после еды я должен пойти послушать, как зачитывают список, закончили ли они, и сообщить им об этом. Когда публикуется почетный список, участники опроса выступают в роли посыльных. Теперь Боб Кэмпбелл иногда заходит по вечерам, чтобы обсудить дела и заняться различными видами спорта. Во время экзамена у меня были мужчины, которые по ночам работали с гуттаперчей, магнитами и т.д. Это намного лучше, чем читать романы или разговаривать после пяти с половиной часов напряженного письма”.

Его отец, услышав эту новость, написал из Эдинбурга:

“Я сердечно поздравляю вас с вашим местом в списке. Я полагаю, оно выше, чем предполагали спекулянты, и настолько высоко, насколько рассчитывал Хопкинс. Желаю вам успехов в присуждении призов Смита; обязательно напишите мне результат. Я увижусь с миссис Моррисон и, думаю, зайду к доктору Глоагу, чтобы поздравить его. У него есть по крайней мере три ученика, получивших награды с отличием”.

Его друзья в Эдинбурге были очень довольны. “Я получаю поздравления от всех, - пишет его отец, 18 лет, “ включая профессора Келланда, Сэнди Фрейзер и всех других компетентных лиц.... Сегодня вечером или в понедельник я ожидаю услышать о Призах Смита. И снова, 6 февраля 1854 года: “Джордж Уэддерберн зашел в мою комнату вчера в 2 часа ночи, просмотрев субботнюю “Таймс”, доставленную экспрессом.... Поскольку вы равны Старшему в чемпионском испытании, вы очень немного отстаєте от него”.

Или снова, 5 марта 1854 года:

- Тетя Джейн уговорила меня позировать для моей картины, так как сказала, что ты сам этого хотел и имеешь право просить об этом как Писатель. У меня было четыре сеанса с сэром Джоном Уотсоном Гордоном, и сейчас это далеко продвинулось; я думаю, это очень похоже. Это размер “киткэт”, чтобы дополнить фотографию Дайс, на которой изображены твоя мать и ты сам, которую тетя Джейн сказала, что оставит тебе.

И вот долгие годы подготовки подошли к концу. Искусный мастер был оснащен своими инструментами; он мог приступить к работе, чтобы раскрыть секреты Природы; он был волен использовать свой гений и свои знания для решения тех задач, для которых он чувствовал себя наиболее подходящим.

ГЛАВА III. РАННИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. —ПРОФЕССОР В АБЕРДИНЕ.

С этого времени жизнь Максвелла становится летописью его трудов и открытий. Однако, вероятно, будет проще всего отделить, насколько это возможно, биографические детали от подробного отчета о его научной работе, оставив это для последовательного рассмотрения в последующих главах и упоминая о нем лишь постольку, поскольку это может оказаться необходимым для объяснения упоминаний в его письмах.

Он оставался в Кембридже до Долгих каникул 1854 года, читая “Логику” Милля. “Я испытываю на себе действие Милля, - пишет он 25 марта 1854 года, - но принимаю его медленно. Я не думаю, что он последний в своем роде. Я думаю, что требуется больше, чтобы пролить свет на связь ощущений с наукой и показать, чем это не является”. Он также читал статью Беркли “Теория зрения” и “очень восхищался ею”.

Примерно в то же время он изобрел офтальмоскоп.¹⁹

“Я сделал инструмент, позволяющий заглядывать в глаз через зрачок. Трудность состоит в том, чтобы направить свет в это маленькое отверстие и одновременно заглянуть внутрь; но эта трудность преодолена, и я могу совершенно отчетливо видеть большую часть задней части глаза с изображением свечи на ней. Люди не испытывают никаких неудобств при осмотре, и я заставляю собак сидеть совершенно неподвижно и не отводить глаз. Глаза собак очень красивы сзади — медного цвета, с великолепными яркими пятнами и сеточками синего, желтого и зеленого, с большими и малыми кровеносными сосудами”.

После каникул он вернулся в Кембридж, и буквы относятся к цветному верху. Итак, мисс Кей, 24 ноября 1854 г., стр. 208:

“В последнее время я был очень занят разными делами и только начинаю готовить работы для экзамена в Челтенхэме, который я должен провести примерно 11 декабря. Мне также нужно оформить документы, чтобы отполировать моих щенков. с. Я много вращал цвета и получил самые точные результаты, доказывающие, что все глаза обычных людей устроены одинаково, хотя некоторые лучше других, и что другие люди видят два цвета вместо трех; но все те, кто это делает, согласны между собой. Я нарисовал цветной треугольник, по которому вы можете различить все.

“Если вы сможете найти в Эдинбурге людей, которые не видят цветов (я знаю, что Диксоны этого не делают), пожалуйста, наметьте, что я хотел бы их увидеть. Я научил одного из них хитрости, с помощью которой он безошибочно различает цвета. Я также сконструировал пару прищуривающих очков и начинаю оперировать косоглазого человека”.

Статья, написанная для его собственного использования первоначально где-то в 1854 году, но переданная в качестве прощального подарка его другу Фаррару, который собирался стать магистром в Мальборо, дает нам некоторое представление о его взгляде на жизнь в возрасте двадцати трех лет.

“Тот, кто хочет наслаждаться жизнью и действовать свободно, должен постоянно иметь перед глазами работу дня. Не вчерашняя работа, чтобы он не впал в отчаяние; и не завтрашняя, чтобы он не стал провидцем - не та, которая заканчивается с наступлением дня, которая является мирской работой; и не та, которая остается только на вечность, ибо ею он не может формировать свои действия.

“Счастлив тот человек, который может распознать в работе сегодняшнего дня неотъемлемую часть работы жизни и воплощение работы Вечности. Основы его уверенности неизменны, ибо он стал причастником Бесконечности. Он усердно осуществляет свои повседневные предприятия, потому что настоящее дано ему во владение.

“Таким образом, Человек должен быть олицетворением божественного процесса природы и демонстрировать единство бесконечного с конечным, не пренебрегая своим временным существованием, помня, что только в нем возможно индивидуальное действие; и в то же время не закрывая от своего взгляда то, что вечно, зная, что Время - это тайна, созерцать которую человек не может, пока ее не просветит вечная Истина”.

Его отцу стало плохо на рождественских каникулах того года, и он не смог вернуться в Кембридж в начале семестра Великого поста. “Мои шаги, - пишет он 20 г. К. Дж. Манро из Эдинбурга, 19 февраля 1855 г., “ больше не будут такими уж редкими и кривыми до пасхального семестра.... Я

хотел бы знать, сколько недель пребывания в бакалаврии приходится на каждый из этих семестров, и когда они начинаются и заканчиваются. Пересмотрите Календарь, и когда найдете, сделайте пометку”.

Он вернулся в Кембридж на майский семестр, работая над движением жидкостей и над своим цветным топом. Статья “Эксперименты с цветом, воспринимаемым глазом” была направлена в Королевское общество Эдинбурга 19 марта 1855 года. Эксперименты были показаны Кембриджскому философскому обществу в мае следующего года, и результаты, таким образом, описаны в двух письмах 21 года к его отцу, в субботу, 5 мая 1855 г.:

“Королевское общество было очень тактично, прислав мне мою статью о ‘Цветах’ как раз тогда, когда я хотел получить ее для журнала Philosophical here. Я должен показать им фокусы в понедельник вечером, и я был там, готовя их эксперименты при газовом свете. Сегодня вечером в моих покоях состоится собрание для обсуждения ‘Теории моральных чувств’ Адама Смита, так что я должен немедленно убрать свой мусор. Я снова работаю над электричеством и пробиваюсь к взглядам немецких писателей-тяжеловесов. Требуется много времени, чтобы привести в порядок все представления, которые получаешь от этих людей, но я надеюсь разобраться в предмете и прийти к чему-то понятному в виде теории

“Трюк с цветом сработал в понедельник, 7-го. У меня были корректурные листы моей статьи, и я собирался прочесть, но передумал и вместо этого заговорил, что больше соответствовало цели. Были разные люди, которые думали, что синий и желтый создают зеленый, поэтому мне пришлось их разубедить. Я взял в университете книгу цветов Хэя. Библиотека, и я просматриваю образцы, сопоставляя их с верхом. У меня есть новый трюк - натягивать веревку горизонтально над верхом, чтобы касаться верхней части оси. Движение оси заставляет струну вибрировать одновременно с вращением волчка, и цвета видны в дымке, создаваемой вибрацией. Томсон покрутил волчок и обнаружил, что моя диаграмма цветов согласуется с его экспериментами, но он сомневается в коричневых тонах, в том, каков их состав. У меня есть коричневый колкотар, и я могу сделать из него белый, синий и зеленый; кроме того, смешав красный с небольшим количеством синего и зеленого и большим количеством черного, я могу точно подобрать колкотар.

“Я совершенствовал свой инструмент для заглядывания в глаза. У Уэра есть маленький зверек, похожий на старину Аска, который сидит довольно устойчиво и, кажется, любит, когда на него смотрят, а у меня есть несколько мужчин, у которых большие зрачки и они не хотят позволять мне заглядывать внутрь. Я отчетливо видел изображение свечи во всех глазах, которые я пробовал, и у некоторых были видны прожилки сетчатки; но в глазах собак были видны все разветвления вен с великолепной синей и зеленой сетью, так что вы могли скопировать все. Я показывал многим мужчинам изображение в моем собственном глазу, выключая свет до тех пор, пока зрачок не расширится, а затем позволяя ему включиться.

“Я изучаю электричество и работаю с движением жидкости, и у меня получилось состояние жидкости, способной течь одним и тем же путем в течение длительного времени и не извиваться”.

Британская ассоциация собралась в Глазго в сентябре 1855 года, и Максвелл присутствовал на заседании и показал свой цветной топ в доме профессора Рамзи некоторым из

заинтересованных лиц. В письмах²² своему отцу примерно в то же время описываются некоторые события встречи и его собственные планы на этот семестр.

“У нас была статья Брюстера ‘Теория трех цветов в спектре”, в которой он относился к Уэвеллу с философской жалостью, поручая его заботам профессора. Вартман из Женевы, который считался величайшим авторитетом в делах такого рода — по сути, в случаях дальтонизма. Уэвелл был в комнате, но вышел и избежал ссоры; а Стоукс сделал несколько замечаний, изложив суть дела не только четко, но и вежливо. Однако Брюстер, похоже, не видел, что Стоукс признал правильность своих экспериментов, и газеты представили Стокса как человека, ставящего под сомнение точность экспериментов.

“Я привожу в порядок свою электрическую математику и вижу некоторые части, которые раньше были довольно туманными; но сейчас у меня не так много времени на это, потому что я читаю о тепле и жидкостях, чтобы не лгать в своих лекциях. Я получил записку от Общества искусств по поводу платометра, в которой выражалась благодарность и предлагалось покрыть расходы в размере 10 фунтов стерлингов при условии, что машина будет произведена в рабочем состоянии. Когда я уложу все это в голове, я намерен написать об этом Джеймсу Брайсону.

“Я получил длинное письмо от Thomson о цветах и электричестве. Он начинает верить в мою теорию о том, что все цвета могут быть отнесены к трем стандартным, и он очень рад, что я решил попробовать его электрические консервы.

“... Трудно поддерживать свой интерес к интеллектуальным вопросам, когда друзей интеллектуального толка мало. Однако есть много друзей, не являющихся интеллектуалами, которые помогают развить активные и практичные привычки ума, что редко удается чрезмерно интеллектуальным людям. А потому, если мне суждено закончить этот семестр, я намерен скорее пристраститься к рабочим, которые заканчивают занятия, чем к щенкам, которые в основном доставляют неприятности. Тем временем нужно подумать об экзамене.

“Вы говорите, доктор Уилсон прислал свою книгу. Я напишу и поблагодарю его. Полагаю, это о дальтонизме. Я намерен приступить к работам Пуассона по электричеству и магнетизму завтра. Я взял их в библиотеке. До сих пор я читал романы — “Ширли” и “Ньюкомы”, а теперь “Вестуорд Хо”.

“Макмиллан предлагает написать книгу по оптике с моей помощью, и я чувствую склонность к этой работе. Составление книги по математике сопряжено с большими хлопотами, особенно по предмету, с которым вы знакомы, поскольку, исправляя ее, вы поступаете так, как поступили бы с щенками. — посмотрите, верны ли принцип и результат, и забудьте обратить внимание на мелкие ошибки в ходе работы. Тем не менее, я ожидаю, что работа будет полезной, поскольку включает в себя тяжелую работу и, в конце концов, много оскорблений со стороны тренеров и студентов и, конечно же, никакой напрасной славы, за исключением затяжек Макмиллана. Но, если я правильно задумал план учебной книги по оптике, она будет сильно отличаться по форме, хотя и не по содержанию, от тех, что используются сейчас”.

Речь шла об экзамене на получение стипендии в Тринити, и Максвелл был избран 10 октября 1855 года.

Его немедленно попросили прочитать лекцию по гидростатике и оптике для Колледжа старшим классам третьего курса и подготовить контрольные работы для тех, кто задавал вопросы. В результате он отказался брать учеников, чтобы иметь время для чтения и частных занятий математикой, а также для встреч с людьми, которые посещали его лекции.

В ноябре он пишет: “Я читаю лекции уже две недели, и аудитория, кажется, улучшается; они приходят и задают вопросы, что является хорошим знаком. Я строил кривые, чтобы показать соотношение давления и объема в газах, и они упрощают изучение предмета”.

Тем не менее, он находил время посещать лекции профессора Уиллиса по механике и продолжать свое чтение. “Я читал, - пишет он, - старые книги по оптике и нахожу в них многое гораздо лучшее, чем то, что является новым. Иностранные математики открывают для себя методы, которые были хорошо известны в Кембридже в 1720 году, но сейчас забыты”.

“Пуассон” был прочитан, чтобы помочь ему с его собственными взглядами на электричество, которые быстро созревали, и первая из той великой серии работ, которая произвела революцию в науке, была опубликована 10 декабря 1855 года, когда его статья о “Силовых линиях Фарадея” была прочитана в Кембриджском философском обществе.

Следующий семестр застал его снова в Кембридже за работой над лекциями, полным планов относительно нового цветного топа и других вопросов. В начале февраля он получил письмо от профессора Форбса, в котором сообщалось, что должность профессора естественной философии в Маришал-колледже в Абердине вакантна, и предлагалось подать заявление.

Он решил стать кандидатом, если его отец одобрит. “Что касается меня, - пишет он, - я думаю, что чем раньше я приступлю к обычной работе, тем лучше, и что лучший способ приступить к такой работе - заявить о своей готовности, подав заявление о ее выполнении”. 20 февраля он пишет: “Однако мудрость бывает многих видов, и я не знаю, какая из них больше всего присуща мудрым советчикам, научная, практическая, политическая или церковная. Я слышал, что есть кандидаты всех мастей, полагающиеся на преобладание того или иного из этих видов мудрости в составе правительства”.

Вторая часть статьи на тему “Силовые линии Фарадея” была прочитана в течение семестра. В письме от 4 марта он выражает надежду, что вскоре сможет полностью написать статью. “В этом семестре я ничего подобного не делал, - говорит он, - но только начинаю чувствовать, как снова включается электрическое состояние”.

Его отец работал в Эдинбурге, поддерживая его кандидатуру в Абердине, и когда в середине марта он вернулся на Север, то обнаружил, что все хорошо подготовлено. Они вдвоем вернулись в Гленелер после нескольких дней в Эдинбурге, и Максвелл готовился вернуться в Кембридж, когда 2 апреля его отец скорпостижно скончался.

В письме миссис Блэкберн он сообщает: “Мой отец скорпостижно скончался сегодня в двенадцать часов. Он давал указания насчет сада и сказал, что, как обычно, присядет и немного отдохнет. Через несколько минут я попросил его лечь на диван, но он, казалось, не был склонен это делать; и тогда я дал ему немного эфира, который помог ему раньше. Прежде чем

он смог взять что-либо, у него была небольшая борьба, и все было кончено. После этого он едва дышал”.

Почти сразу после этого Максвелл был назначен в Абердин. Смерть его отца расстроила, по крайней мере, некоторые намерения, с которыми он претендовал на этот пост. Он знал, что старик был бы рад видеть его сидящим в шотландском кресле. Он тоже надеялся прожить полгода со своим отцом в Гленлере, но этому не суждено было сбыться. Несомненно, лаборатория и свобода должности, по сравнению с рутинной работой по подготовке людей к командировкам, имели свои плюсы; тем не менее, можно усомниться в том, что выбор был мудрым для него. Занятия в классах муштры, состоящих по большей части из необученных парней, по азам физики и механики были, как говорит Нивен в своем предисловии к собранию сочинений, не тем занятием, для которого он лучше всего подходил; в Кембридже, если бы он остался, среди его учеников всегда были бы одни из лучших математиков того времени; и он мог бы основать лет за десять-пятнадцать до этого Кембриджскую школу физиков, которая с такой гордостью вспоминает его как своего учителя.

Прощание в Тринити было печальным занятием.²³ таким образом, 4 июня он пишет мистеру Р. Б. Литчфилду:

“В четверг вечером я выезжаю по Северо-западному маршруту на Север. Я занят осмотром огромного количества бумаг и т. Д., Ибо некоторые вещи, которые не подлежат сжиганию, лежат среди большого количества горючих материалов, а некоторые мягкие и пригодны для упаковки.

“Не очень приятно спускаться вниз и жить в одиночестве, но и оставаться наверху тоже было бы не очень приятно, когда все, что тебе нужно было делать, лежало в другом месте. Переходное состояние от мужчины к Дону должно наступить в конце концов, и оно должно быть болезненным, как постепенное истончение нервов. Когда это сделано, боли больше нет, но время от времени появляются напоминания от каких-нибудь присосок, стержневых корешков или других остатков старых нервов, просто чтобы показать, что там было и что могло бы быть”.

Лето 1856 года он провел в Гленлере, где его гостями были разные друзья — Лашингтон, Макленнан, два кузена Кей и другие. Он продолжал работать над оптикой, электричеством и магнетизмом, а в октябре был занят "торжественным обращением или манифестом к натурфилософам Севера, которым требовались кофе и анчоусы, ревущий горячий огонь и расправленные фалды, чтобы сделать это естественным”. Это была его инаугурационная лекция.

В ноябре он был в Абердине. В письмах²⁴ мисс Кей, профессору Кэмпбелл и Си Джей Манро рассказывается о работе сессии. Последнее письмо от Гленлера, датированное 20 мая 1857 года, после окончания работы.

“Сеанс прошел достаточно гладко. У меня было Солнце, все основы оптики, и я проработал всю экспериментальную часть вплоть до линий Фраунгофера, которые было великолепно наблюдать с помощью водяной призмы, которую я установил в виде кубической коробки со стороной пять дюймов

“У меня очень хорошо получилось с теплом. Эксперименты со скрытым теплом оказались очень точными. Это была моя роль, и класс смог объяснить и проработать результаты лучше, чем я ожидал. В следующем году я намерен смешать экспериментальную физику с механикой, посвятив вторник и ЧЕТВЕРГ (что бы сказал Стоукс?) науке точного проведения экспериментов

“На прошлой неделе я сварил хлорофилл (как его называют химики), зеленую жидкость, которая окрашивает невидимый свет в красный цвет

“Моей последней работой было сведение уравнений цвета, которое я сделал в прошлом году. Результат был в высшей степени удовлетворительным”.

Другое письмо, от 25 июня 1857 г., также адресованное Манро, касается работы Университетской комиссии и нового устава.

“Я не видел статью 7, но я полностью согласен с вашим несогласием с ней. Исходя из принципа личной заинтересованности, я думаю, что мужчинам, которые намеревались сохранить свои братства с помощью безбрачия и рукоположения и получили их на этой основе, не должно быть позволено покидать хор девственниц или пренебрегать священническим служением, но на основе этих принципов им должно быть позволено доживать свои дни, при условии, что общее количество ежегодно исцеляемых душ не составляет 20 фунтов стерлингов в Королевской книге. Но моя доктрина заключается в том, что различные ранги должностных лиц колледжа должны быть установлены на такой основе, что, хотя случайные преподаватели иногда могут быть выбраны из числа новичков, которые скоро уезжают, надежные помощники преподавателей и те, у кого есть простое призвание в этом направлении, должны через несколько лет быть избраны постоянными должностными лицами Колледжа и в свое время быть преподавателями и деканами, а также пожилыми людьми с разрешением вступить в брак, или, скорее, никогда не запрещать и не задавать никаких вопросов по этому поводу, и с разрешением уйти на пенсию после стольких лет службы в качестве пожилых людей. Что касается мирских мужчин, то у нас должен быть ограниченный срок существования, и это независимо от брака или ”приходского дома”.

Прошло более двадцати лет, прежде чем схема, изложенная в вышеупомянутом письме, к чему-либо привела; но на момент смерти Максвелла в 1879 году заседала другая комиссия, и план, предложенный Максвеллом, лег в основу уставов почти всех колледжей.

На зимнюю сессию 1857-58 годов он снова был в Абердине.

Премия Адамса была учреждена в 1848 году некоторыми членами Колледжа Святого Иоанна и связана ими с именем Адамса “в подтверждение их понимания чести, которую он оказал своему колледжу и Университету, став первым среди математиков Европы, определившим по возмущениям неизвестное местоположение возмущающей планеты, внешней по отношению к Урану”. Профессор Чаллис, доктор Паркинсон и сэр Уильям Томсон, эксперты, выбрали в качестве предмета для присуждения премии в 1857 году “Движение колец Сатурна”. За это Максвелл решил побороться, и в его письмах в конце 1857 года рассказывается о ходе выполнения этой задачи. Так, в письме от 28 августа 26 Льюису Кэмпбеллу из Гленлера он пишет:—

“Я изо всех сил атаковал "Сатурн", время от времени возвращаясь к атаке. Я проделал несколько брешей в твердом кольце, и теперь я выплескиваюсь в текучее, среди поистине поразительного столкновения символов. Когда я появлюсь снова, это будет в сумеречном кольце, которое чем-то похоже на состояние воздуха, если предположить, что осада Севастополя ведется из орудийного леса на 100 миль в одну сторону и на 30 000 миль в другую, и стрельба никогда не прекращается, а продолжается по кругу радиусом 170 000 миль”.

И снова от 27 для мисс Кэй 28 ноября:—

“Я довольно стабильно работаю с тех пор, как пришел сюда. Класс маленький и неяркий, но я собираюсь с самого начала дать им много работы, и я нахожу это хорошим планом. У меня много моих старых учеников, которые продолжают изучать более высокие предметы. Это не входит в курс обучения в колледже, поэтому они даются просто по выбору, и я начал с наименее забавной части того, что я намерен им дать. Многие читали летом, потому что в начале месяца они подготовили для меня очень хорошие статьи по старым предметам. Большую часть своего свободного времени я занимался "Кольцами Сатурна", которые сейчас продвигаются, но в последнее время мне нужно было написать очень много длинных писем — некоторые Гленлеру, некоторые частным друзьям, а некоторые и вовсе о науке.... Я получил письма от Томсона и Чаллиса о Сатурне, от Хейворда из Даремского университета — о латунной крышке, которую он хочет иметь. Он говорит, что было действительно обнаружено, что земля регулярно меняет свою ось, как я и предполагал. Фарадей также писал о своих собственных предметах. Мне также пришлось написать для Forbes длинный отчет о цветах; так что на каждую полученную заметку мне приходилось исписывать пару листов в ответ, а отчетность о прогрессе требует много письма и орфографии”.

Он разработал модель (ныне находящуюся в Кавендишской лаборатории), демонстрирующую движение спутников в возмущенном кольце, “в назидание здравомыслящим поклонникам изображений”.

Эссе было удостоено премии и обеспечило его автору большой авторитет среди ученых.

В другом письме, написанном во время той же сессии, он говорит: “Я считаю, что моя основная работа здесь заключается в том, чтобы научить моих людей избегать расплывчатых выражений типа “определенная сила”, что означает неопределенность; *может* вместо *должен*; *будет* вместо *есть*; *пропорциональна* вместо *равной*”.

Смерть осенью его друга по колледжу Помероя от лихорадки в Индии была для него большим ударом; его письма того времени показывают глубину его чувств и убеждений.

Вопрос о слиянии двух колледжей в Абердине, Королевского колледжа и колледжа Маришал, выходил на первый план. “Знайте все, - говорит он в письме профессору Кэмпбеллу, - что я фузионщик”.

В феврале 1858 года он все еще был занят исследованием колец Сатурна, усердно работая одновременно со своими занятиями. Он организовал добровольный класс для своих прошлогодних студентов и читал вместе с ними “Теорию Луны и астрономию” Ньютона. За этим последовала “Электричество и магнетизм”, книга Фарадея является основой всего, “поскольку он сам является ядром всего электрического с 1830 года”.

В феврале 1858 года он объявил о своей помолвке с Кэтрин Мэри Дьюар, дочерью директора Маришальского колледжа.

“Дорогая тетя” (пишет он, 28 февраля 1858 г.), “это пришло, чтобы сообщить вам, что у меня будет жена

“Не бойся, она не математик, но помимо этого есть и другие вещи, и она, конечно, не остановит математику. Единственный, кто может говорить как очевидец, - это Джонни, а он видел ее только тогда, когда мы оба пытались изображать безразличие. С тех пор мы пытались это сделать, но это не сработало, и это не принесло пользы ни тому, ни другому”.

Свадьба состоялась в начале июня. Профессор Кэмпбелл сохранил некоторые из писем, написанных Максвеллом мисс Дьюар, и они содержат “отчет о чувствах, которые в последующие годы перелились в действие и воплотились в супружеской жизни, о которой можно говорить только как о жизни беспримерной преданности”.

Проект слияния двух колледжей, на который уже делалась ссылка, продолжался, и схема была завершена в 1860 году.

Два колледжа были объединены в Абердинский университет, и созданная таким образом новая кафедра естественной философии была заполнена назначением Дэвида Томсона, профессора естественной философии Королевского колледжа и старшего преподавателя Максвелла. Мистер У. Д. Нивен в своем предисловии к работам Максвелла, говоря об этом назначении, пишет:

“Профессор Томсон, хотя и не сравнимый с Максвеллом как физик, тем не менее был замечательным человеком. Он отличался исключительной силой характера и большими административными способностями, и он сыграл видную роль в объединении колледжей. Он также был замечательным лектором и преподавателем и многое сделал для повышения уровня научного образования на севере Шотландии. Таким образом, выбор, сделанный членами Комиссии, хотя и был почти неизбежен, привел к тому, что создалось впечатление, что Максвелл потерпел неудачу как учитель. Однако, похоже, нет никаких доказательств, подтверждающих такой вывод. Напротив, если мы можем судить по количеству студентов, добровольно посещавших его занятия во время его последней сессии в колледже, он, по-видимому, был столь же популярен как профессор, сколь и достоин личного уважения”.

Вопрос о том, был ли Максвелл великим учителем, иногда обсуждался. Я надеюсь, что на следующих страницах будет дан ответ на него. Он не был выдающимся лектором. Как говорит профессор Кэмпбелл, 29 “Между невежеством его студентов и его обширными знаниями было трудно найти общую меру. Совет, который он однажды дал другу, чьей обязанностью было проповедовать перед сельской паствой: ‘Почему бы тебе не дать им похудеть?’ - должно быть, часто был применим и к нему самому.... Иллюстрации *ignotum per ignotius*, или того, что непонятное объясняется каким-то ненаблюдаемым свойством знакомого, множились с поразительной быстротой. Тогда дух прямоты и парадокса, хотя он и осознавал его опасность, часто овладевал им против его воли, и либо из-за застенчивости, либо из-за сиюминутного возбуждения, либо из-за отчаяния добиться того, чтобы его поняли, приводил его к “хаотичным заявлениям”, прерывающимся какой-нибудь причудой ироничного юмора”.

Но преподавание не всегда достигается чтением лекций. Его книги и статьи - это обширные хранилища предложений и идей, которые с тех пор разрабатывали самые способные умы за последние двадцать лет. Поговорить с ним в течение часа означало обрести вдохновение для работы в течение года; увидеть его энтузиазм и заслужить его похвалу было достаточно, чтобы компенсировать многие утомительные усилия по поводу какой-нибудь упрямой детали прибора, которая работала неправильно, или какой-нибудь небольшой ошибки, которая угрожала оказаться неразрешимой и отказывалась поддаваться расчетам. Уверенное суждение потомков подтвердит вердикт о том, что клерк Максвелл был великим учителем, хотя чтение лекций толпе неподготовленных студентов было задачей, для которой другие были приспособлены лучше, чем он.

ГЛАВА IV. ПРОФЕССОР КОРОЛЕВСКОГО КОЛЛЕДЖА В ЛОНДОНЕ. ЖИЗНЬ В ГЛЕНЛЕРЕ.

В 1860 году Форбс оставил кафедру естественной философии в Эдинбурге. Максвелл и Тейт были кандидатами, и Тейт был назначен. Летом того же года Максвелл получил вакантную должность профессора натурфилософии в Королевском колледже Лондона. Этого он придерживался до 1865 года, и этот период его жизни отличается появлением некоторых из его наиболее важных работ. Работа была тяжелой; курс обучения в колледже длился более девяти месяцев в году; кроме того, в его обычные обязанности входили вечерние лекции для ремесленников. Его жизнь в Лондоне была полезна ему в тех возможностях, которые она предоставила ему для личного знакомства с Фарадеем и другими. Он также возобновил свои дружеские отношения с различными друзьями из Кембриджа.

Он был на знаменитом оксфордском собрании Британской ассоциации в 1860 году, где демонстрировал свою цветную шкатулку для смешивания цветов спектра. В 1859 году на собрании в Абердине он прочитал в Разделе А свою первую статью о “Динамической теории газов”, опубликованную в *Philosophical Magazine* за январь 1860 года. Вторая часть статьи, посвященная теплопроводности и другим явлениям в газе, была опубликована в июле 1860 года, после Оксфордской встречи.

Статья о “Теории сложных цветов” была передана Королевскому обществу профессором Стоксом в январе 1860 года. В нем содержится отчет о его коробке с красками в окончательно принятой форме (большинство важных частей прибора все еще находятся в Кавендишской лаборатории), а также ряд наблюдений миссис Максвелл и его самого, которые будут более полно описаны позже.

В ноябре 1860 года он получил за эту работу медаль Румфорда Королевского общества.

Следующий, 1861 год имеет большое значение в истории электротехники. Британская ассоциация собралась в Манчестере, и был назначен Комитет по стандартам электрического

сопротивления. Максвелл не был членом. Комитет отчитался на собрании в Кембридже в 1862 году и был повторно назначен с расширенными обязанностями. Было добавлено имя Максвелла, среди прочих, и он принимал видное участие в обсуждениях комитета, который, как говорится в их отчете³⁰, представленном в 1863 году, пришел к мнению, “после зрелого рассмотрения, что система так называемых абсолютных электрических единиц, основанная на чисто механических измерениях, является не только лучшей из когда-либо предложенных систем, но и единственной, которая согласуется с нашими нынешними знаниями как об отношениях, существующих между различными электрическими явлениями, так и о связи между ними и фундаментальными измерениями времени, пространства и массы”.

Приложение С к настоящему Отчету “Об элементарных связях между электрическими измерениями” носит имена Клерка Максвелла и Флиминга Дженкина и является основой всего, что было сделано с тех пор в области абсолютных электрических измерений; в то время как в Приложении D теми же двумя сотрудниками приводится отчет об экспериментах с абсолютной единицей электрического сопротивления, проведенных в лаборатории Королевского колледжа Максвеллом, Флимингом Дженкином и Бальфуром Стюартом. Дальнейшие эксперименты описаны в отчете за 1864 год. Начатая таким образом работа была завершена в 1894 году путем легализации во всем цивилизованном мире системы электрических устройств, основанной на тех, которые описаны в этих отчетах.

Тем временем взгляды Максвелла на электромагнитную теорию незаметно развивались. Статьи о “Физических силовых линиях”, которые появлялись в *Philosophical Magazine* в 1861 и 1862 годах, содержат зачатки его теории, выраженной в то время, правда, в несколько материальной форме. В статье, опубликованной в январе 1862 года, была установлена ныне хорошо известная связь между отношением электрических единиц и скоростью света, и его переписка с Флимингом Дженкином и К. Дж. Манро примерно того же времени частично связана с экспериментальной проверкой этой связи. Его эксперименты по этому вопросу были опубликованы в “*Philosophical Transactions*” за 1868 год.

Эта электрическая теория занимала его мысли в основном в 1863 и 1864 годах. В сентябре прошлого года он пишет³¹ из Гленлера С. Хокин, который занял место Бальфура Стюарта во время второй серии экспериментов по измерению сопротивления.

“Я занимался несколькими электрическими проблемами. У меня есть теория “электропоглощения”, *m.E.* остаточного заряда и т.д., И я очень хочу определить удельную индукцию, электрическое сопротивление и поглощение хороших диэлектриков, таких как стекло, шеллак, гуттаперча, эбонит, сера и т.д.

Я также очистил электромагнитную теорию света от всех необоснованных допущений, так что мы можем безопасно определять скорость света, измеряя притяжение между телами, поддерживаемое при данной разнице потенциалов, величина которой известна в электромагнитных измерениях.

“Я надеюсь, что в Британской ассоциации будут катушки сопротивления”.

Результатом этой работы стал его величайший труд по электрике “Динамическая теория электромагнитного поля”, прочитанный в Королевском обществе 8 декабря 1864 года.

Но молекулярная теория газов все еще занимала его внимание.

В 1862 году, в письме [32](#) Г. Р. Друпю, он говорит:—

“Некоторое время назад, исследуя теорию газов Бернулли, я с удивлением обнаружил, что внутреннее трение газа (если оно зависит от столкновения частиц) не должно зависеть от плотности.

“Стоукс изучал эксперименты Грэма по скорости потока газов по тонким трубкам и обнаружил, что трение, если оно не зависит от плотности, объясняет результаты Грэма; но, если оно взято пропорционально плотности, очень сильно отличается от этих результатов. Это кажется довольно любопытным результатом и дополнительным явлением, объясняемым теорией газов о ‘столкновении частиц’. И все же одно явление противоречит этой теории — соотношение между удельной теплоемкостью при постоянном давлении и постоянном объеме воздуха = $1 \cdot 408$, в то время как оно должно быть $1 \cdot 333$ ”.

И снова [33](#) в том же году, 21 апреля 1862 года, Льюису Кэмпбеллу:—

“Герр Клаузиус из Цюриха, один из философов тепла, работал над теорией газов как маленьких тел, летающих повсюду, и обнаружил несколько случаев, в которых мы с ним не совпадаем. Так что я снова работаю над этим. Недавно появилось несколько экспериментальных результатов, скорее подтверждающих эту теорию, чем нет.

“Я надеюсь, вам понравится отсутствие учеников. Я нахожу, что разделение их на более мелкие классы является большим подспорьем для меня и для них; но полное забвение о них на определенные промежутки времени является необходимым условием для того, чтобы воздать им должное в надлежащее время”.

Эксперименты по вязкости газов, которые легли в основу Лекции Бейкериана в Королевском обществе, прочитанной 8 февраля 1866 года, были результатом этой работы. В его доме по адресу Палас Гарденс, 8, Кенсингтон, был большой чердак во всю длину.

“Для поддержания надлежащей температуры в комнате в течение нескольких дней поддерживался большой огонь в разгар очень жаркой погоды. Чайники держали на огне, и в помещение поступало большое количество пара. Миссис Максвелл исполняла обязанности кочегарки, что было очень изнурительной работой, когда выполнялась в течение нескольких часов подряд. После этого в помещении поддерживалась прохлада для последующих экспериментов с использованием значительного количества льда”.

В следующем году, в мае 1866 года, был прочитан его доклад “Динамическая теория газов”, в котором были исправлены ошибки в его предыдущих работах, на которые указал Клаузиус.

Тем временем он оставил свою профессорскую должность в Лондоне в конце сессии 1865 года, и его сменил профессор У. Г. Адамс.

Следующие четыре года он жил в основном в Гленлере, работая над своей теорией электричества, изредка, как мы увидим, посещая Лондон и Кембридж и проявляя активный интерес к делам своего района. В 1865 году он тяжело заболел, во время которого миссис Максвелл с большой заботой ухаживала за ним. Его переписка была обширной и отнимала много его времени. Много внимания также уделял изучению английской литературы; он любил читать миссис Максвелл вслух Чосера, Мильтона или Шекспира.

Он также прочитал много богословской и философской литературы, и все, что он прочитал, помогло только укрепить ту твердую веру в основы христианства, в которой он жил и умер.

В 1867 году он и миссис Максвелл совершили визит в Италию, который доставил огромное удовольствие обоим.

Его главной научной работой была подготовка его книги “Электричество и магнетизм”, которая появилась только в 1873 году; в основном это было время спокойных размышлений и подготовки к его следующей великой задаче - основанию Школы физики в Кембридже.

В 1868 году должность директора Объединенного колледжа в Университете Сент-Эндрюс оказалась вакантной из-за отставки Форбса, и несколько профессоров пригласили Максвелла баллотироваться. Он, однако, отказался представить свое имя короне.

ГЛАВА V. КЕМБРИДЖ.—ПРОФЕССОР ФИЗИКИ.

Во время своей отставки в Гленлере с 1865 по 1870 год Максвелл часто бывал в Кембридже. Он учился в Математическом колледже в 1866 и 1867 годах, а затем снова в 1869 и 1870 годах.

Правила для Tripos действовали практически без изменений с 1848 года, и многие считали, что круг включенных предметов недостаточно широк и что срочно необходимы изменения, если Кембридж хочет сохранить свои позиции центра математического преподавания.

Натурфилософия упоминалась в Расписании, но натурфилософия включала только динамику и астрономию, гидростатику и физическую оптику, с некоторыми простыми гидродинамическими данными и звуком.

Предметы о теплоте, электричестве и магнетизме, теория упругих тел и колебаний, Вихревое движение в гидродинамике и многое другое были практически новыми с 1848 года. Их создали Стоукс, Томсон и Максвелл в Англии и Гельмгольц в Германии.

Соответственно, в июне 1868 года Сенат утвердил новый план экзаменов, который должен был вступить в силу в январе 1873 года, и эти различные предметы были явно включены.

Мистер Нивен, который был одним из тех, кого исследовал Максвелл в 1866 году, пишет в предисловии к собранию сочинений:

“В течение нескольких лет, предшествовавших 1866 году, когда Максвелл вернулся в Кембридж в качестве модератора математического трипоса, учеба в университете потеряла связь с великими научными движениями, происходящими за пределами его стен. Говорили, что некоторые из самых популярных предметов мало интересуют нынешнее поколение, и стали раздаваться громкие жалобы на то, что, хотя такие отрасли знаний, как теплота, электричество и магнетизм, не были включены в экзамен Tripos, кандидаты тратили свое время и энергию на

математические мелочи, не представляющие научного интереса и практических результатов. Максвелл тепло присоединился к движению за реформы. Своими вопросами в 1866 году и в последующие годы он вдохнул новую жизнь в экзамен; он принимал активное участие в разработке новой схемы, введенной в 1873 году; но больше всего своими трудами он оказал мощное влияние на молодых сотрудников университета и в значительной степени способствовал тем изменениям, которые произошли сейчас”.

Но у Университета не было средств для преподавания этих предметов, и 25 ноября 1868 года был назначен Синдикат, или Комитет, “для рассмотрения наилучших средств обучения студентов физике, особенно теплу, электричеству и магнетизму, а также методов обеспечения аппаратуры для этой цели”.

Доктор Куксон, магистр Колледжа Святого Петра, принимал активное участие в работе Синдиката. Среди членов были профессор Стоукс, профессор Лайвинг, профессор Хамфри, доктор Фиар и доктор Раут. Сам Максвелл той зимой был в Кембридже в качестве экзаменатора Tripos, и его работа в качестве модератора и экзаменатора в течение двух предыдущих лет во многом показала необходимость изменений и указала направление, в котором они должны развиваться.

Синдикат сообщил об этом 27 февраля 1869 года. Они обратили внимание на отчет Королевской комиссии от 1850 года. Члены комиссии “особо подчеркивали важность развития знаний о великих разделах экспериментальной физики в университете”; и на странице 118 своего отчета, после похвалы тому, как предмет Физической оптики изучается в Университете, и указания на то, что “возможно, нет государственного учреждения, где он был бы лучше представлен или проводился с большим рвением и успехом на пути оригинальных исследований”, они заявили, что “нельзя назвать причин, по которым другие великие отрасли естествознания не должны стать в равной степени объектами внимания, или почему Кембридж не должен стать великой школой физики и эксперимента, как это было раньше”. Это уже математическое и классическое обучение”.

И снова члены Комиссии замечают: “В Университете, насквозь пропитанном математическим духом, можно ожидать, что изучение физики в его стенах приобретет самый высокий и строгий тон, будет изучаться в более абстрактных формах, с более постоянными ссылками на математические законы и, следовательно, с большей надеждой перенести их один за другим в область математических исследований, чем где-либо еще”.

После привлечения внимания к этим заявлениям отчет Синдиката затем продолжается:—

“В схеме экзаменов на получение дипломов с отличием по математическим дисциплинам, утвержденной Милостью Сената 2 июня 1868 года, теплоте, электричеству и магнетизму, если они не были введены впервые, придавалось гораздо большее значение, чем в любой предыдущий период, и отныне эти предметы будут требовать соответствующего внимания от кандидатов на получение дипломов с отличием по математике. Синдикат почти полностью ограничил свое внимание вопросом обеспечения общественного обучения теплу, электричеству и магнетизму. Они признают важность и преимущество самоучителей по этим предметам в нескольких колледжах, но они также осознают большой импульс, придаваемый исследованиям такого рода, и большой объем дополнительной подготовки, которую студенты

могут получить под руководством преподавателя и благодаря знаниям, полученным в хорошо оборудованной лаборатории ”.

“В соответствии с этими взглядами и на раннем этапе своих обсуждений они попросили профессоров³⁴ университета, которые занимаются преподаванием математики и физических наук, совместно обсудить существующие средства преподавания экспериментальной физики, особенно теплоты, электричества и магнетизма, и сообщить им, как они могли бы удовлетворить возросшие требования Университета в этом отношении”.

“Профессора, с которыми были проведены такие консультации, представили Синдикату доклад по этому вопросу, который Синдикат теперь просит разрешения представить Сенату. В нем указывается, как требования Университета могут быть “частично удовлетворены”, но профессора четко заявляют, что они “не думают, что они в состоянии удовлетворить потребность в обширном курсе лекций по физике, рассматриваемом как таковой, и в значительной степени экспериментально”. Поскольку можно справедливо считать, что Экспериментальная физика находится в ведении одного или нескольких вышеупомянутых профессоров, Синдикат рассмотрел вопрос о том, нельзя ли сейчас или когда-нибудь в будущем принять какие-либо меры для обеспечения эффективного преподавания этой отрасли науки, не прибегая к услугам дополнительного профессора. Они, однако, придерживаются мнения, что такая договоренность не может быть достигнута в настоящее время, и что требования дела могут быть наилучшим образом удовлетворены путем учреждения новой профессорской должности, которая прекращается с прекращением срока полномочий профессора, избранного первым. Услуги человека высочайших достижений в науке, посвятившего свою жизнь публичному преподаванию в качестве такого профессора и занимающегося оригинальными исследованиями, принесли бы Университету неисчислимую пользу”.

Далее в отчете указывается, что потребуется лаборатория, а также аппаратура. Подсчитано, что 5000 фунтов стерлингов покроют расходы на лабораторию, а 1300 фунтов стерлингов - на необходимое оборудование. Предусмотрены также расходы на демонстратора и лаборанта, и отчет завершается рекомендацией назначить специальный финансовый комитет для рассмотрения способов привлечения средств.

Профессора в своем отчете Синдикату указывают, что преподавание экспериментальной физики необходимо для подготовки к математическим экзаменам, экзаменам по естественным наукам, некоторым специальным экзаменам и первому экзамену на степень магистра. Им показалось очевидным, что для нового профессора есть работа.

В мае 1869 года Финансовый синдикат, рекомендованный вышеупомянутым отчетом, был назначен “для рассмотрения средств, необходимых для назначения профессора и демонстратора экспериментальной физики, а также для предоставления зданий и оборудования, необходимых для этого научного факультета, и, кроме того, для рассмотрения других потребностей Университета и источников, из которых эти потребности могут быть обеспечены”.

Синдикат попытался покрыть расходы, запросив несколько колледжей, готовы ли они внести взносы из своих корпоративных фондов, но безуспешно.

“Ответы колледжей указывали на такое отсутствие согласия с любым предложением о привлечении взносов из корпоративных фондов колледжей путем любого вида прямого налогообложения, что Синдикат счел себя обязанным отказаться от идеи получения необходимых средств из этого источника и, соответственно, ограничить количество объектов, выполнение которых они должны рекомендовать Сенату”.

Внешняя власть была необходима, прежде чем колледжи подчинились налогообложению для университетских целей, и Королевской комиссии 1877 года было поручено реализовать многие предложения Синдиката. Тем временем они ограничились рекомендацией средств для увеличения годовой стипендии в размере 660 фунтов стерлингов для профессора, демонстратора и ассистента и основной суммы в размере 5000 фунтов стерлингов или около того на расходы по строительству здания.

Отчет Синдиката был опубликован в измененном виде в мае 1870 года, и до принятия по нему какого-либо решения вице-канцлер доктор Аткинсон 13 октября 1870 года опубликовал “следующее щедрое предложение его светлости герцога Девонширского, ректора Университета”, который был председателем Комиссии по научному образованию.

- Холкер-Холл,
Грейндж, Ланкашир.

“Мой дорогой господин вице-канцлер, я имею честь обратиться к вам с целью сделать предложение Университету, которое, если вы не увидите возражений, я буду вам очень обязан представить таким образом, какой вы сочтете нужным, на рассмотрение Совета и Университета.

“Я нахожу в отчете Синдиката физических наук от 29 февраля 1869 года, рекомендующем учредить должность профессора и демонстратора экспериментальной физики, что здания и оборудование, необходимые для этого отдела науки, оцениваются в 6300 фунтов стерлингов.

“Я желаю помочь Университету в выполнении этой рекомендации и, соответственно, буду готов выделить средства, необходимые для строительства здания и оборудования, как только Университет в других отношениях завершит подготовку к преподаванию экспериментальной физики и утвердит план здания.

Остаюсь, мой дорогой господин вице-канцлер,
искренне Ваш,
Девоншир”.

Благодаря его великодушному поступку университет был освобожден от всех расходов, связанных со зданием. Милость, учреждающая должность профессора экспериментальной физики, была утверждена Сенатом 9 февраля 1871 года, а 8 марта было назначено на выборы.

Тем временем, кто должен был стать профессором? Упоминалось имя сэра У. Томсона, но было известно, что он не примет этот пост. Затем к Максвеллу обратились, и поначалу он не хотел покидать Гленлер. Профессор Стоукс, почтенный Дж.У. Стратт (лорд Рэлей), мистер Блор из Тринити и другие написали ему. Письмо лорда Рэрея³⁵ выглядит следующим образом:

“Кембридж, 14 февраля 1871 года.

“Когда я пришел сюда в прошлую пятницу, я обнаружил, что все говорят о новом профессорском звании и надеются, что вы придете. Похоже, Томсон определенно отказался.... Здесь нет никого, кто хоть сколько-нибудь подходил бы для этой должности. Большинству тех, кто что-либо знает об этом, нужен не столько лектор, сколько математик, имеющий реальный опыт в экспериментировании и способный направить энергию молодых стипендиатов и бакалавров в нужное русло. Должно быть много таких, кто был бы готов работать под началом компетентного человека и которые, обучаясь сами, оказывали бы ему материальную помощь.... Я надеюсь, что вас можно будет уговорить прийти; если нет, то я не знаю, кто это будет. Не утруждайте себя ответом мне по этому поводу, поскольку я полагаю, что другие писали вам об этом”.

15 февраля Максвелл написал мистеру Блору:

“Когда я получил ваше письмо, у меня не было намерения претендовать на эту должность, и сейчас у меня ее нет, если только я не увижу, что могу принести этим какую—то пользу”. Далее в письме говорится: “Занятия физическими исследованиями, которые могли бы проводиться с помощью людей с кембриджским образованием и которые были бы похвальны для Университета, требуют в целом значительного количества скучного труда, который может быть привлекателен для учеников, а может и нет”.

Однако 24 февраля мистер Блор внес запись в список избирателей:—

“Я уполномочен уведомить, что мистер Джон (*так в оригинале*) Клерк Максвелл, член Королевского совета, бывший профессор естественной философии в Абердине и Королевском колледже в Лондоне, является кандидатом на должность профессора экспериментальной физики”.

Максвелл был избран без возражений. В письме³⁶ своей жене из Кембриджа от 20 марта 1871 года он пишет:

“По поводу профессорского звания есть две партии. Одна хочет популярных лекций, а другая больше интересуется экспериментальной работой. Я думаю, что должна быть градация — популярные лекции и грубые эксперименты для масс; настоящие эксперименты для настоящих студентов; и трудоемкие эксперименты для первоклассных людей, таких как Троттер, Стюарт и Стратт”.

В письме³⁷ от Гленлера К. Дж. Манро, датированном 15 марта 1871 г., он пишет:

“Экспериментальная физика в Кембридже еще не построена, но мы собираемся попытаться. Желательно, чтобы Преподаватель и первокурсник наблюдали и регистрировали (скажем) вибрации магнита вместе, или Преподаватель перевел часы, а первокурсник наблюдал за ним и управлял им”.

В октябре он прочитал свою вводную лекцию. Несколько цитат покажут, с каким духом он подошел к своей задаче.

“В курсе Экспериментальной физики мы можем рассматривать либо Физику, либо Эксперименты в качестве ведущей характеристики. Мы можем либо использовать эксперименты для иллюстрации явлений определенной области физики, либо провести

некоторое физическое исследование, чтобы проиллюстрировать конкретный экспериментальный метод. Со временем нам следует начать в лекционном зале с курса лекций по какой-либо области физики, подкрепленного иллюстративными экспериментами, и завершить в Лаборатории курсом исследовательских экспериментов.

“Позвольте мне сказать несколько слов об этих двух классах экспериментов — Экспериментах иллюстрации и Экспериментах исследования. Цель иллюстративного эксперимента состоит в том, чтобы пролить свет на какую-либо научную идею, чтобы учащийся мог понять ее. Обстоятельства эксперимента устроены так, что явление, которое мы хотим наблюдать или продемонстрировать, выдвигается на первый план, вместо того чтобы быть затемненным и запутанным среди других явлений, как это бывает, когда оно происходит в обычном ходе природы. Демонстрировать наглядные эксперименты, поощрять других к их проведению и всячески культивировать идеи, на которые они проливают свет, составляет важную часть нашей обязанности. Чем проще материалы иллюстративного эксперимента и чем более знакомы они учащемуся, тем более основательно он, вероятно, усвоит идею, которую он призван проиллюстрировать. Образовательная ценность таких экспериментов часто обратно пропорциональна сложности аппарата. Ученик, пользующийся самодельным прибором, который всегда выходит из строя, часто узнает больше, чем тот, кто пользуется тщательно отрегулированными инструментами, которым он склонен доверять и которые он не осмеливается разобрать на части.

“Очень необходимо, чтобы те, кто пытается узнать из книг факты физической науки, могли с помощью нескольких наглядных экспериментов распознать эти факты, когда они встретятся с ними на улице. Наука предстает перед нами в совершенно ином аспекте после того, как мы выяснили, что не только в аудиториях и с помощью электрического света, проецируемого на экран, мы можем наблюдать физические явления, но и в играх и гимнастике, в путешествиях по суше и воде, в воздушных и морских штормах и везде, где находится в движении материя, мы можем найти иллюстрации высочайших научных доктрин.

Поэтому, если мы желаем, для нашей собственной выгоды и чести нашего университета, чтобы Девонширская лаборатория была успешной, мы должны стремиться поддерживать ее в живом единстве с другими органами и способностями нашего ученого сообщества. Поэтому мы сначала рассмотрим отношение, в котором мы находимся к тем математическим исследованиям, которые так долго процветали среди нас, которые имеют дело с нашими собственными предметами и которые отличаются от наших экспериментальных исследований только способом, в котором они представляются уму.

“Нет более мощного метода для внедрения знаний в сознание, чем представление их как можно большим количеством различных способов. Когда идеи, войдя через разные врата, образуют перекресток в цитадели разума, положение, которое они занимают, становится неприступным. Оптике говорят нам, что мысленной комбинации изображений объекта, которые мы получаем со станций, расположенных не дальше, чем два наших глаза, достаточно, чтобы создать в нашем сознании впечатление плотности видимого объекта; и мы обнаруживаем, что это впечатление создается даже тогда, когда мы осознаем, что на самом деле смотрим на две плоские картинки, помещенные в стереоскоп. Поэтому естественно ожидать, что знания физики, полученные в результате совместного использования математического анализа и

экспериментальных исследований, будут более основательными, доступными и долговечными, чем те, которыми обладает простой математик или простой экспериментатор.

“Но как это повлияет на Университет, если люди, изучающие тот курс чтения, который произвел на свет стольких выдающихся ученых, перейдут к экспериментам? Не будет ли их посещение лаборатории считаться не просто временем, отведенным от их более законных занятий, но и внесением тревожащего элемента, загрязняющего их математические концепции материальными образами и подрывающего их веру в формулы учебников? Кроме того, мы уже слышали жалобы на чрезмерное расширение наших исследований и на нагрузку, которую испытывают наши исследователи вопросов из-за веса знаний, которые они пытаются пронести с собой в Палату представителей Сената. Если мы сейчас попросим их развивать свои темы не только с помощью книг и письменных работ, но в то же время с помощью наблюдений и манипуляций, не сломаются ли они совсем? Нам говорят, что физическая лаборатория, возможно, может быть полезна тем, кто занимается естественными науками и кто не занимается математикой, но пытаться совмещать оба вида обучения во время пребывания в университете - это выше сил одного ума.

“Несомненно, для этого чувства есть какая-то причина. Многие из нас уже преодолели начальные трудности математического обучения. Когда мы сейчас продолжаем наше исследование, мы чувствуем, что оно требует напряжения и связано с усталостью, но мы уверены, что если мы только будем усердно работать, наш прогресс будет несомненным.

“С другой стороны, некоторые из нас, возможно, имели некоторый опыт рутинной экспериментальной работы. Как только мы научимся считывать шкалы, наблюдать за временем, фокусировать телескопы и так далее, такого рода работа перестает требовать каких-либо больших умственных усилий. Возможно, у нас устают глаза и спина, но мы не слишком утомляем свой разум.

“Только после того, как мы попытаемся привести теоретическую часть нашего обучения в соприкосновение с практической, мы начинаем испытывать на себе в полной мере эффект того, что Фарадей назвал ‘ментальной инертностью’ — не только трудность распознавания среди конкретных объектов перед нами абстрактного отношения, о котором мы узнали из книг, но и отвлекающую боль от переключения ума от символов к объектам и от объектов обратно к символам. Однако это цена, которую нам приходится платить за новые идеи.

Но когда мы преодолели эти трудности и успешно преодолели пропасть между абстрактным и конкретным, мы получили не просто фрагмент знания; мы приобрели зачатки постоянного ментального дара. Когда путем повторения усилий такого рода мы более полно развиваем научную способность, упражнение этой способности в обнаружении научных принципов в природе и в руководстве практикой с помощью теории перестает быть утомительным, но становится неиссякаемым источником удовольствия, к которому мы возвращаемся так часто, что в конце концов даже наши беспечные мысли начинают течь в научном русле.

Однако наша основная работа в Лаборатории должна заключаться в том, чтобы ознакомиться со всеми видами научных методов, сравнить их и оценить их ценность. Я думаю, что это будет результат, достойный нашего университета, и с большей вероятностью он будет достигнут здесь, чем в какой-либо частной лаборатории, если путем свободного и всестороннего

обсуждения относительной ценности различных научных процедур нам удастся сформировать школу научной критики и помочь развитию доктрины метода.

Но, признавая, что практическое знакомство с методами физической науки является неотъемлемой частью математического и научного образования, нас могут спросить, не придаем ли мы слишком большого значения науке в целом как части гуманитарного образования.

“К счастью, здесь нет вопроса о том, должен ли университет продолжать оставаться местом получения гуманитарного образования или должен посвятить себя подготовке молодых людей к определенным профессиям. Следовательно, хотя некоторые из нас, я надеюсь, могут видеть причину сделать занятия наукой главным делом своей жизни, одной из наших самых постоянных целей должно быть поддержание живой связи между нашей работой и другими гуманитарными дисциплинами Кембриджа, будь то литература, филология, история или философия.

“Существует узкопрофессиональный дух, который может расти среди людей науки точно так же, как это происходит среди людей, занимающихся любым другим специальным делом. Но, несомненно, Университет - это то самое место, где мы могли бы преодолеть эту тенденцию людей становиться, так сказать, раздробленными на маленькие мирки, которые тем более мирские из-за своей малости? Мы теряем преимущество того, что люди самых разных занятий собраны в одно тело, если не пытаемся перенять часть духа даже тех, чья особая область знаний отличается от нашей”.

Другое выражение его взглядов на положение физики в то время можно найти в его обращении к Секции А Британской ассоциации, когда он был президентом на собрании в Ливерпуле в 1870 году.

ГЛАВА VI. КЕМБРИДЖ —КАВЕНДИШСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ.

Но лаборатория еще не была построена. Синдикат, членом которого был Максвелл, был назначен для рассмотрения вопроса о площадке, получения профессиональных консультаций и получения планов и смет. Профессор Максвелл и мистер Троттер посетили различные лаборатории в стране и за рубежом с целью определения наилучшего оборудования. Архитектором был назначен мистер У. М. Фосетт; тендер мистера Джона Лавдея из Кебворта на строительство здания стоимостью 8450 фунтов стерлингов, без учета газа, воды и отопления, был принят в марте 1872 года, и строительство [38](#) было начато летом.

Тем временем Максвелл начал читать лекции, найдя дом, где мог.

“Лекции начинаются 24-го”, - пишет он из Гленлера 19 октября 1872 года. “Я слышу, что лаборатория поднимается, но мне негде поставить свой стул, и я хожу, как кукушка, излагая

свои идеи в химическом лекционном зале в первом семестре; в ботаническом в Великий пост и в сравнительной анатомии на Пасху”.

Строительство было завершено только в июне 1874 года, и 16-го числа канцлер официально преподнес Университету в дар Кавендишскую лабораторию. В переписке, предшествовавшей этому времени, о ней говорилось как о Девонширской лаборатории. Имя Кавендиш увековечивало работу великого физика столетием ранее, чьи труды Максвеллу вскоре предстояло отредактировать, а также щедрость канцлера.

В своем благодарственном письме герцогу Девонширскому университет пишет:—

“Unde vero conventius poterat illis artibus succurri quam e tua domo quæ in ipsis jam pridem inclaruerat. Notum est Henricum Cavendish quem secutus est Coulombius primum ita docuisse, quæ sit vis electrica ut eam numerorum modulis illustraret; adhibitis rationibus quas hodie veras esse constat.” И они предлагают название как подходящее для данного здания. На это канцлер ответил, сославшись на работу Генри Кавендиша: “К чему поно в должности ипс-монарха и номен в память о достойном положении, ид grato animo accepti.”

Здание обошлось намного дороже первоначальной оценки, но щедрость канцлера не была ограничена, и 21 июля 1874 года он написал вице-канцлеру:—

“Я желаю предоставить все инструменты для Кавендишской лаборатории, которые, по мнению профессора Максвелла, могут потребоваться немедленно, либо для его лекций, либо иным образом”.

Максвелл подготовил список, но при этом объяснил, что для обеспечения наилучшего вида инструментов необходимы время и продуманность; и он продолжает, написав вице-канцлеру: “Я думаю, герцог полностью понял из того, что я ему сказал, что оснащение Лаборатории займет несколько лет. Однако я буду считать себя вправе, - говорит он, - предоставить Лаборатории любые инструменты, которые я сконструировал в прежние годы и которые могут оказаться все еще полезными, а также время от времени приобретать другие для специальных исследований”.

В 1877 году в своем ежегодном отчете профессор Максвелл объявил, что канцлер³⁹ теперь “завершил свой дар университету, оснатив Кавендишскую лабораторию оборудованием, соответствующим современному состоянию науки”.

Запас аппаратуры, однако, был все еще невелик, хотя Максвелл сам самым щедрым образом потратил большие суммы на ее пополнение; поскольку профессор был особенно разборчив в приобретении только дорогих инструментов лучших производителей с такими дополнительными усовершенствованиями, какие он мог предложить сам.

В марте 1874 года была учреждена Демонстрационная кафедра физики, и был назначен мистер Гарнетт из колледжа Святого Иоанна.

Работа в лаборатории началась в октябре 1874 года. Поначалу количество студентов было небольшим. Только семнадцать имен фигурируют в⁴⁰ списке Natural Sciences Tripos за 1874 год, и лишь немногие из них занимались физикой.

Опасения, на которые ссылался профессор в своей вводной лекции, что люди, читающие для математических трипо, не найдут времени для посещения лаборатории, были оправданы. Одним из недостатков нашего кембриджского плана было разделение математики и экспериментальной работы, поощряемое нашей системой экзаменов. Предполагается, что экспериментальные знания не нужны для математических заданий; математика, разрешенная для заданий по естественным наукам, очень проста; таким образом, получилось так, что немногие мужчины, читая для математических заданий, посещали лабораторию, и этот печальный результат был усилен действиями Университета в 1877-78 годах, когда правила для математических заданий были снова изменены.⁴¹

Тем не менее, были ученики, жаждущие работать, хотя в основном это были мужчины, уже получившие степень бакалавра и желавшие продолжать физическое чтение и исследования, даже несмотря на то, что это требовало “значительного количества скучного труда, не совсем привлекательного”. Моя собственная работа там началась в 1876 году, и, возможно, будет интересно, если я приведу свои воспоминания о том времени.

Первые эксперименты, которые я могу вспомнить, были связаны с измерением электрического сопротивления. Я хорошо помню, Максвелл объяснял принцип действия моста Уитстоуна, и мое собственное желание в то время, чтобы я пришел в лабораторию до Tripos, а не после. Лорд Рэлей во время экзамена задал простой вопрос, который я не смог задать из-за отсутствия некоторых экспериментальных знаний, и первые несколько слов выступления Максвелла показали мне решение.

Я не посещал его лекции регулярно — они читались, я думаю, в течение часа, который я был вынужден посвятить преподаванию; кроме того, там была его книга “Электричество и магнетизм”, над которой я как раз нырнул перед поездкой, чтобы поработать.

Кристал и Сондер были тогда заняты проверкой закона Ома. Они использовали ряд ячеек томсоновской формы Трея Дэниэлса, и Максвелл хотел, чтобы на этих ячейках были проведены различного рода тесты; я предпринял их и потратил некоторое время на различные простые измерения на них. Затем он поручил мне изучить некоторые свойства слоистого диэлектрика, состоящего, если я правильно помню, из листов парафиновой бумаги и слюды. Таким образом я познакомился с различными аппаратами. Не было ни регулярных занятий, ни установленного набора демонстраций, устраиваемых в экзаменационных целях; они появились позже. Во времена Максвелла те, кто хотел работать, могли пользоваться лабораторией и его помощью, но они были предоставлены в значительной степени самим себе, чтобы узнать об аппарате и наилучших методах его использования.

Несколько позже пришел Шустер и выполнил часть своих работ со спектроскопом. Дж. Э. Х. Гордон был занят предварительными наблюдениями для своего определения постоянной Верде, а Нивен проводил различные электрические эксперименты, в то время как Флеминг работал над катушками сопротивления В. А.

Мои собственные вкусы лежали в направлении оптики. Максвелл очень хотел, чтобы я исследовал свойства определенных кристаллов. Я думаю, что это были кристаллы хлората калия, о которых впоследствии писали Стоукс и Рэлей; но эти кристаллы предстояло выращивать - медленный процесс, который, как он предполагал, занял бы годы; и поскольку я

хотел подготовить диссертацию для экзамена в Стипендию Тринити в 1877 году, эту работу пришлось отложить.

В конце концов я выбрал в качестве объекта исследования форму волновой поверхности в двухосном кристалле и приступил к работе в отведенной мне комнате. Профессор приходил почти каждый день, чтобы посмотреть, как у меня дела. Обычно он приводил с собой свою собаку, которая иногда сидела взаперти в соседней комнате, пока он учился в колледже. Собакам не разрешалось посещать колледж, и Максвелл забавно описал, как однажды Тоби забрел в Тринити и, повинувшись какому-то собачьему инстинкту, немедленно обнаружил, к своему величайшему изумлению, что находится в месте, где собак не было с тех пор, как появился колледж. Тоби не всегда вел себя тихо в отсутствие хозяина, и его присутствие в соседней комнате вызывало некоторое беспокойство.

Когда возникали трудности, Максвелл всегда был готов выслушать. Часто ответ приходил не сразу, но всегда через некоторое время. Я помню, как однажды, когда я оказался перед серьезной дилеммой, я рассказал ему свою длинную историю, и он сказал: —

“Ну, Кристал разговаривала со мной, а Гарнетт и Шустер задавали вопросы, и все это образовало хорошую толстую корку вокруг моего мозга. Тому, что вы сказали, потребуется некоторое время, чтобы усвоиться, но мы посмотрим”. Через несколько дней он вернулся со словами: “Я думал над тем, что вы сказали на днях, и если вы сделаете то—то и то-то, все будет в порядке”.

Ему передали мою диссертацию, и в день выборов, возвращаясь в Кембридж для поступления, я встретил его на вокзале Блетчли и хорошо помню его теплые поздравления и слова поддержки.

Следующие полтора года я регулярно работал в лаборатории и видел его почти ежедневно во время семестра.

Об этих последних годах действительно мало что можно рассказать. Его собственная научная работа продолжалась. “Электричество и магнетизм” были написаны в основном в Гленлере. Примерно во время своего возвращения в Кембридж, в октябре 1872 года, он пишет⁴² Льюису Кэмпбеллу:—

“Я постоянно занимаюсь разжиганием кларендонской прессы, но они были сносно регулярными в течение двух месяцев. Я нахожу, что в среднем у них выходит девять листов за тринадцать недель. Тейт оказывает мне большую помощь в выявлении абсурдностей. Я перехожу к кватернионам и поместил некоторые из них в свою книгу”.

Книга была опубликована в 1873 году. Учебник по теплоте был написан в тот же период, в то время как “Материя и движение”, “небольшая книга на великую тему”, была опубликована в 1876 году.

В 1873 и 1874 годах он был одним из экзаменаторов Tripos по естественным наукам, а в 1873 году он был первым дополнительным экзаменатором Tripos по математике в соответствии со схемой, для продвижения которой он так много сделал в 1868 году.

Многие из его более коротких статей были написаны примерно в то же время. Выходило девятое издание *Британской энциклопедии*, и профессор Бейнс заручился его помощью в работе.

Статьи “Атом”, “Притяжение”, “Капиллярное действие”, “Строение тел”, “Диффузия”, “Эфир”, “Фарадей” и другие принадлежат ему.

Он также написал ряд статей для *Nature*. Некоторые из них представляют собой рецензии на книги или отчеты ученых, такие как заметки Фарадея и Гельмгольца, опубликованные с их портретами; другие, опять же, представляют собой оригинальный вклад в науку. Среди последних многие имеют отношение к молекулярному строению тел. Две лекции — первая о “Молекулах”, прочитанная перед Британской ассоциацией в Брэдфорде в 1873 году; вторая о “Динамических доказательствах молекулярного строения тел”, прочитанная перед Химическим обществом в 1875 году, — имели особое значение. Заключительные предложения первой лекции часто цитировались. Они звучат следующим образом: —

“В небесах мы обнаруживаем по их свету, и только по их свету, звезды, настолько удаленные друг от друга, что никакая материальная вещь никогда не могла перейти от одной к другой; и все же этот свет, который является для нас единственным доказательством существования этих отдаленных миров, говорит нам также, что каждый из них состоит из молекул того же типа, что и те, которые мы находим на земле. Молекула водорода, например, будь то на Сириусе или Арктуре, совершает свои колебания точно в одно и то же время.

Таким образом, каждая молекула во всей вселенной несет на себе отпечаток метрической системы, столь же отчетливый, как метр парижских архивов или двойной королевский локоть храма в Карнаке.

“Никакая теория эволюции не может быть сформирована для объяснения сходства молекул, поскольку эволюция обязательно подразумевает непрерывные изменения, а молекула неспособна к росту или распаду, к зарождению или разрушению.

“Ни один из природных процессов с тех пор, как возникла Природа, не привел ни к малейшему изменению свойств какой-либо молекулы. Следовательно, мы не можем приписать ни существование молекул, ни идентичность их свойств какой-либо из причин, которые мы называем естественными.

С другой стороны, точное равенство каждой молекулы всем другим молекулам того же типа придает ей, как хорошо сказал сэр Джон Гершель, существенный характер промышленного изделия и исключает идею о ее вечности и самосуществовании.

Таким образом, нас повели по строго научному пути, очень близкому к точке, на которой наука должна остановиться — не то чтобы наука была отстранена от изучения внутреннего механизма молекулы, которую она не может разобрать на части, так же как и от исследования организма, который она не может собрать воедино. Но, прослеживая историю материи, наука останавливается, когда она убеждается, с одной стороны, что молекула была создана, а с другой — что она не была создана ни одним из процессов, которые мы называем естественными.

“Наука некомпетентна рассуждать о создании самой материи из ничего. Мы достигли предельных пределов наших мыслительных способностей, когда признали, что, поскольку материя не может быть вечной и самосущей, она, должно быть, была создана.

“Только когда мы созерцаем не материю саму по себе, а форму, в которой она действительно существует, наш разум находит то, за что он может ухватиться.

“То, что материя как таковая должна обладать определенными фундаментальными свойствами, что она должна существовать в пространстве и быть способной к движению, что ее движение должно быть постоянным и так далее, - это истины, которые, насколько нам известно, могут быть того рода, которые метафизики называют необходимыми. Мы можем использовать наши знания о таких истинах в целях дедукции, но у нас нет данных для предположений относительно их происхождения.

Но то, что в каждой молекуле водорода должно быть именно столько вещества, и не больше, - это факт совсем другого порядка. Здесь мы имеем дело с особым распределением материи — *сочетанием*, по выражению доктора Чалмерса, вещей, которые, как нам нетрудно представить, были устроены иначе.

“Форма и размеры орбит планет, например, не определяются каким-либо законом природы, а зависят от конкретного сочетания веществ. То же самое относится и к размеру земли, на основе которого был выведен стандарт так называемой метрической системы. Но эти астрономические и земные величины намного уступают по научной значимости тому самому фундаментальному из всех стандартов, который составляет основу молекулярной системы. Как мы знаем, действуют естественные причины, которые имеют тенденцию изменять, если в конце концов не разрушать, все устройства и размеры земли и всей солнечной системы. Но хотя с течением веков на небесах происходили катастрофы, которые все еще могут произойти, хотя древние системы могут быть разрушены и из их руин развиваются новые системы, молекулы, из которых построены эти системы, — краугольные камни материальной вселенной — остаются целыми и неносными. Они и по сей день остаются такими, какими были созданы — совершенными по количеству, мере и весу; и из неизгладимых черт, запечатленных в них, мы можем узнать, что те стремления к точности в измерениях и справедливости в действиях, которые мы считаем одними из самых благородных человеческих качеств, принадлежат нам, потому что они являются существенными составляющими образа Того, кто в начале сотворил не только небо и землю, но и материалы, из которых состоят небо и земля”.

Это было подвергнуто критике в *Nature* мистером Си Джеем Манро, а позже Клиффордом в одном из своих эссе.

В переписке с епископом Глостера и Бристоля на управление по сравнению молекул производимых изделий с учетом профессор Кэмпбелл, и в ней Максвелл отмечает, что последняя часть статьи “атом” в *энциклопедия* предназначена, чтобы встретиться с мистером Манро критики.

В 1874 году Британская ассоциация собралась в Белфасте под председательством Тиндалла. Присутствовал Максвелл, который впоследствии опубликовал в журнале “*Блэквудз Мэгэзин*” забавный пересказ обращения президента. Это, а также некоторые другие стихи, написанные примерно в то же время, могут быть процитированы здесь. Профессор Кэмпбелл собрал ряд стихотворений, написанных Максвеллом в разное время, которые замечательным образом иллюстрируют как серьезную, так и веселую сторону его характера.

БРИТАНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ, 1874 ГОД.

Примечания к Посланию Президента.

На самых зарождениях науки парсонсы, которые тогда всем управляли,
Умело владея молотком и зубилом, создавал богов по подобию людей;
Пока не возникла торговля, и, наконец, не появились люди исключительной власти
Вытеснил демонов и богов атомами, которые существуют и по сей день.
Тем не менее, они не упразднили богов, но отослали их подальше с дороги,
С редчайшим нектаром для питья и голубыми полями, на которых нечего колыхать.
Из ничего ничего не возникает, говорили они нам — ничто не происходит случайно, только по воле судьбы;
Нет ничего, кроме атомов и пустоты, все остальное - просто устаревшие прихоти!
Тогда зачем человеку заискивать перед существами, которые не могут существовать,
Добиться какого-то мелкого повышения в туманных королевствах тумана?
Но не лучами солнца и не сверкающими лучами дня,
Страх перед богами должен быть рассеян, но только словами и их чудесной игрой.

Так, ступая по нехоженому пути, поэт-философ поет
О семенах могущественного мира — первоосновах всего сущего;
Как свободно он рассеивает свои атомы перед началом лет;
Как он облекает их силой, как одеждой, эти маленькие несжимаемые сферы!
И все же он не оставляет их жестокосердными - он одаривает их любовью и ненавистью,
Как сферические маленькие британские Задницы в бесконечно малом состоянии;
Так же, как тот живой Платон, которого иностранцы прозвали Плато,⁴³
Капает масло в виски с водой (для иностранцев так подслащивают);
Каждая капля хранится отдельно от другой, заключенная в эластичную оболочку,
Пока не тронута нежным чувством, вызванным уколом булавки:
Таким образом, в атомах простое столкновение вызывает сенсационный трепет,
Эволюционировал через все виды эмоций, таких как чувство, понимание и воля
(Ибо, сложив головы все вместе, атомы, как это делают члены совета,
Могут объединяться, чтобы выразить мнение, для каждого из них новое).
Я бы сказал, что здесь вообще никто не испытал настоящего возмущения,

До тех пор, пока в Ольстер-холле не состоится митинг возмущения;
Тогда накатывает волна эмоций, тогда возникают благородные чувства,
Пока вы все не примете резолюцию, которая застигнет врасплох каждого человека.
Таким образом, чистый элементарный атом, единица массы и мышления,
Силой простого сопоставления достигается соответствие жизни и ощущений;
Итак, на протяжении бесчисленных поколений происходит передача бесструктурных гормонов
Позволяет нашей расе унаследовать мысли зверей, рыб и червей.
Мы также чтим наших отцов и матерей, дедушек и бабушек;
Но как нам теперь, с нашей точки зрения, почтить память предков?
Итак, сначала давайте почтим атом, такой живой, такой мудрый и такой маленький;
Далее давайте воздадим хвалу атомистам, Эпикуру, Лукрецию и всем остальным.
Давайте со слабой похвалой осудим епископа Батлера, в котором соединилось множество атомов
Сформировать ту замечательную структуру, которую ему нравилось называть своим разумом.
Наконец, восхвалим мы благородное тело, к которому на данный момент принадлежим,
Прежде чем стремительный водоворот атомов безжалостно погнал нас вперед,
Британский ассоциативный Левиафан, которому поклонялся Гоббс,
Воплощение мудрости, созданное нашими безмозглыми ноблями,
Который будет продолжать бесконечные дискуссии, когда я, и, вероятно, вы,
Растаяли в бесконечной лазури —по-английски, пока все не стало синим.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ.

Белфаст, 1874 год.

В совершенно неопределенное время и в совершенно неопределенных местах,
Атомы покинули свой небесный путь,
И случайными объятиями
Породил все, что есть у существа.
И хотя кажется, что они держатся вместе,

И формируют здесь “ассоциации”,
И все же, рано или поздно, они разрывают свои связи,
И через глубины космической карьеры.
Итак, мы, сидевшие, угнетенные наукой,
Как британские Ослы, мудрые и серьезные,
Теперь они превратились в диких Красных Львов,[44](#)
Окружая нашу добычу, мы беснуемся.
Таким образом, путем быстрой метаморфозы,
Мудрость оборачивается остроумием, а наука - шуткой,
Бессмыслица - это благовония для наших носов,
Потому что, когда Красные Львы говорят, они курят.
Привет, чепуха! сухая кормилица Красных львов,[45](#)
От тебя мудрые учатся своей мудрости;
Из тебя они извлекают эти истины науки,
Который они снова превращают в тебя.
Какие сочетания идей
Только бессмыслица может быть разумно сформирована!
Какой мудрец обладает половиной той силы, которой обладает она,
Взять штурмом башни Истины?
Уступите же, вы, правилам жесткого разума!
Раствори, ты тоже, слишком плотный смысл!
Превратиться на время в бессмыслицу,
Затем конденсируют в какой-нибудь более благородной форме.
Скоро, слишком скоро, холодное утро
Этот поток души кристаллизуется;
Тогда те, кто сейчас несет чушь, презирают
Может быть, слишком поздно узнаешь, в чем заключается мудрость.

КОМИТЕТУ ПОРТРЕТНОГО ФОНДА КЕЙЛИ.

1874.

О несчастный род человеческий, ограниченный пространством!

Какую честь вы можете воздать тому, чей разум

К тому, что лежит за пределами, проник?

Символы, которые он создал, вознесут ему хвалу,

И веди его дальше невообразимыми путями

К завоеваниям новым, в еще не созданных мирах.

Во-первых, определители! в упорядоченном ряду

И массивная колонна выстроилась, перед ним идут,

Сформировать фалангу для его надежной защиты.

Вы, степени n -го корня из -1!

Вокруг его головы в непрерывных [46](#) циклах бегут,

Как невоплощенные духи направления.

И вы, вы, неразвивающиеся свитки!

Помашите своими украшенными булочками над хозяином,

Внесено в список его ярких изобретений.

Вы, кубические поверхности! тройками и девятками

Протяните вокруг его лагеря свои двадцать семь линий-

Печать Соломона в трех измерениях.

Маршируй, символическое воинство! величественным шагом,

К пылающим границам Пространства и Времени!

Наступила пауза, пока Дикинсон не изобразил,

В двух измерениях мы можем проследить форму

О том, чья душа, слишком большая для вульгарного пространства,

В n измерениях процветал без ограничений.

В ПАМЯТЬ ОБ ЭДВАРДЕ УИЛСОНЕ,

Который раскаялся в том, что собирался написать после раздела.

Твердое тело (*поет*).

Джин телом встречает тело

Лечу по воздуху,

Когда тело ударяется о тело,

Он полетит? и куда?

Влияние Илки имеет свою меру,

Никогда раньше я не был таким;

И все же парни оценивают меня,

Или, по крайней мере, они пытаются.

Джин телом встречает тело

Совершенно бесплатно,

Как они путешествуют потом

Мы не всегда видим.

Проблема Ильки имеет свой метод

По аналитике high;

Что касается меня, я ничего из них не знаю,

Но кто я, черт возьми, такой?

Другой задачей, занявшей много времени, с 1874 по 1879 год, было издание трудов Генри Кавендиша. Кавендиш, приходившийся двоюродным дедом канцлеру, опубликовал всего две статьи по электричеству, но он оставил около двадцати пакетов рукописей по математике и экспериментальному электричеству. Они были переданы в руки Максвелла в 1874 году герцогом Девонширским.

Нивен в своем предисловии к собранию статей, посвященных этой книге, пишет так:

“Эта работа, опубликованная в 1879 году, повысила репутацию Кавендиша, раскрыв неожиданные достижения этого проницательного физика в Теории электричества, особенно в измерении электрических величин. Работа обогащена множеством ценных примечаний, в которых взгляды и результаты Кавендиша рассматриваются в свете современной теории и методов. Особенно ценными являются методы, применяемые для определения электрических емкостей проводников и конденсаторов - предмета, в котором сам Кавендиш проявил значительные навыки как математического, так и экспериментального характера.

Важность задачи, поставленной Максвеллом в связи с работами Кавендиша, будет понятна из следующего отрывка из его введения к ним:

“Несколько трудно объяснить тот факт, что, хотя Кавендиш подготовил полное описание своих экспериментов с зарядами тел и даже взял на себя труд написать точную копию, и хотя все это, по-видимому, было сделано до 1774 года, и он продолжал проводить эксперименты по электричеству до 1781 года и прожил до 1810 года, он хранил свою рукопись при себе и никогда ее не публиковал.

“Кавендиш больше заботился о расследовании, чем о публикации. Он предпринял бы самые кропотливые исследования, чтобы разрешить трудность, которую никто, кроме него самого, не мог оценить или даже осознал, и мы не можем сомневаться, что результат его исследований, в случае успеха, доставлял ему определенную степень удовлетворения. Но это не пробудило в нем того желания сообщить об открытии другим, которое в случае обычных людей науки обычно обеспечивает публикацию их результатов. Насколько полно эти исследования Кавендиша остались неизвестными другим деятелям науки, показывает внешняя история электричества”.

“Вероятно, вам покажется несколько затруднительным поставить себя на место физика столетней давности и установить точное значение его экспериментов. Но Максвелл взялся за это дело с величайшим энтузиазмом и преуспел в том, чтобы идентифицировать себя с методами Кавендиша. Он показал, что Кавендиш действительно предвосхитил несколько открытий в области электротехники, которые были сделаны с его времени. Кавендиш был первым, кто сформулировал концепцию и измерил электростатическую емкость и удельную индуктивную емкость; он также предвосхитил закон Ома”.

В последние годы жизни миссис Максвелл перенесла серьезную и продолжительную болезнь, и работа Максвелла значительно расширилась из-за его обязанностей сиделки. Однажды он не спал в постели в течение трех недель, но проводил свои лекции и эксперименты в лаборатории, как обычно.

Примерно в это же время некоторые из тех, кто был “Апостолами” в 1853-57 годах, возродили привычку собираться вместе для обсуждения. Клуб, в который входили профессора Лайтфут, Хорт и Уэсткотт, был назван “Эранус”, и три вклада Максвелла в него были сохранены и напечатаны профессором Кэмпбеллом.

После того, как статьи Кавендиша были закончены, у Максвелла появилось больше времени для его собственных оригинальных исследований, и в 1879 году были опубликованы две важные статьи. Статья “Напряжения в разреженных газах, возникающие из-за неравенств температур” была напечатана в журнале “Труды Королевского общества” и посвящена теории радиометра; другая статья “Теорема Больцмана” опубликована в журнале “Труды Кембриджского философского общества”. В предыдущем году он прочитал Реде лекцию на тему “Телефон”. Он также начал готовить второе издание “Электричества и магнетизма”.

Его здоровье пошатнулось во время пасхального семестра 1879 года; действительно, в течение двух лет до этого его беспокоили симптомы диспепсии, но он ни с кем не консультировался по этому поводу. Он, как обычно, уехал из Кембриджа в июне, надеясь, что быстро поправится в Гленлере, но вместо этого ему стало хуже. В октябре доктор Сандерс из Эдинбурга сказал ему, что ему осталось жить не более месяца. Он вернулся в Кембридж, чтобы оказаться под присмотром доктора Пейджета, который смог в какой-то мере облегчить его самые тяжелые

страдания, но болезнь, от которой его мать умерла в том же возрасте, продолжала прогрессировать, и он скончался 5 ноября. Единственной его заботой во время последней болезни были те, кого он оставил позади. миссис Максвелл была инвалидом, зависевшим от него во всем, и мысль о ее беспомощности была единственной вещью, которая беспокоила его в эти последние дни.

Заупокойная служба состоялась в часовне Тринити-колледжа, а затем его останки были перевезены в Шотландию и преданы земле на семейном кладбище в Корсоке, Кирккадбрайт.

Мемориальное издание его работ было выпущено издательством Кембриджского университета в 1890 году. Портрет Лоуса Дикинсона висит в холле Тринити-колледжа, а в лаборатории стоит бюст работы Бема.

После его смерти миссис Максвелл передала его научную библиотеку Кавендишской лаборатории, а после своей смерти оставила сумму в размере около 6000 фунтов стерлингов для основания стипендии по физике, которая будет проводиться в лаборатории.

* * * * *

На предыдущих страницах содержится некоторый отчет о жизни клерка Максвелла как человека науки. У его характера были и другие стороны, и любая его жизнь была бы неполной без краткого упоминания о них. Его письма к жене и другим близким друзьям на протяжении всей его жизни демонстрируют глубину его религиозных убеждений. Высокая цель, о которой свидетельствует документ, врученный нынешнему декану Кентерберийского университета при отъезде из Кембриджа, постоянно вдохновляла его и время от времени появляется в его трудах. Студенческий вечерний гимн, сочиненный в 1853 году, когда он был еще студентом, выражает те же чувства —

Через созданий , которых Ты создал
Покажи сияние Твоей славы,
Будь проявлением вечной истины
По своей сути преходящи,
Пока зеленая земля и океан не поседеют,
Массивный камень и нежное лезвие,
Рассказывай одну и ту же бесконечную историю,
“Мы - Истина, облеченная в форму”.
Научи меня так читать Твои труды
Что моя вера, набирающая новые силы,
Пусть из мира в мир продолжается,
Продолжение плодотворного поиска мудрости,

Пока Твое дыхание наполняет мой разум,
Я провозглашаю вечный символ веры,
Часто эта великолепная тема возобновляется,
Бог, Господь наш, воистину есть Бог.

Его взгляды на отношение науки к вере изложены в его письме⁴⁷ уже упоминавшемуся епископу Элликотту —

“Но мне было бы очень жаль, если бы толкование, основанное на самой гипотетической научной гипотезе, было привязано к тексту книги Бытия, даже если бы таким образом оно избавлялось от старого утверждения комментаторов, которое давно перестало быть понятным. Скорость изменения научной гипотезы, естественно, намного выше, чем скорость изменения библейских интерпретаций, так что, если интерпретация основана на такой гипотезе, это может помочь поддерживать гипотезу на плаву еще долгое время после того, как ее следовало бы похоронить и забыть.

“В то же время я думаю, что каждый отдельный человек должен делать все возможное, чтобы произвести впечатление на свой разум масштабом, порядком и единством Вселенной, и должен нести эти идеи с собой, когда читает такие отрывки, как 1-я глава Послания к Колоссянам (см. “Легкая нога в послании к Колоссянам”, стр. 182), точно так же, как расширенные представления о масштабах и единстве мира жизни могут быть полезны нам при чтении Псалма viii, Евр. ii. 6 и т.д.”

И снова в своем письме⁴⁸ секретарю Института Виктории он излагает причины своего отказа стать членом —

“Я думаю, что людям науки, так же как и другим людям, нужно учиться у Христа, и я думаю, что христиане, чьи умы научны, обязаны изучать науку, чтобы их представление о славе Божьей было настолько обширным, насколько на это способно их существо. Но я думаю, что результаты, к которым приходит каждый человек в своих попытках привести свою науку в соответствие со своим христианством, не следует рассматривать как имеющие какое-либо значение, кроме как для самого человека, и только для него на время, и не должны носить отпечаток общества”.

Профессор Кэмпбелл и мистер Гарнетт предоставили нам свидетельства тех, кто был с ним в его последние дни, о силе его собственной веры. На смертном одре он сказал, что был занят попытками обрести истину; что человек может обрести лишь малую толику истины, но это то, что нужно знать, в кого мы верили.

ГЛАВА VII. НАУЧНАЯ РАБОТА—ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ.

Со дня смерти клерка Максвелла прошло всего пятнадцать лет, и надеяться на правильную оценку ценности его работы и ее соотношения с работой других, кто трудился в той же области, еще слишком рано.

Так, Нивен в конце своего некролога в “Трудах Королевского общества” говорит: “Редко бывает, чтобы способности к изобретательству и изложению, привязанность к физической науке и способность развивать ее математически проявлялись в одном уме в одинаковой степени. Однако потребовались бы способности, в чем-то схожие с способностями Максвелла, чтобы описать более тонкие черты произведений, возникших в результате этого сочетания, каждое из которых несет на себе тонкий, но безошибочный отпечаток гениальности”. И снова в предисловии к работам Максвелла, опубликованном в 1890 году, он писал: “Нынешнему редактору также не кажется, что еще не пришло время, когда можно будет должным образом оценить оживляющее влияние ума Максвелла на современную научную мысль”.

Однако целью настоящей серии является попытка дать некоторый отчет о работе людей науки за последние сто лет и показать, как каждый внес свою лепту в наш нынешний запас знаний. Таким образом, эту задачу еще предстоит выполнить. Пытаясь сделать это, я хотел бы выразить свою признательность другим, кто уже писал о научной работе Максвелла, особенно мистеру У. Д. Нивену, на чье предисловие к работам Максвелла так часто ссылались; мистеру Гарнетту, автору части II. о “Жизни Максвелла”, в которой рассказывается о его вкладе в науку; и профессору Тейту, который в “*Nature*” от 5 февраля 1880 года дал отчет о работе клерка Максвелла, “обязательно краткий, но достаточный, чтобы даже читатель, не знакомый с математикой, увидел, насколько велик был его вклад в современную науку” - отчет тем более интересный, что, снова цитируя профессора Тейта, “я был близко знаком с ним с тех пор, как мы вместе учились в школе”.

Основной вклад Максвелла в науку можно разделить на три раздела— “Восприятие цвета”, “Молекулярная физика” и “Электрические теории”. В дополнение к этим были другие статьи, представляющие высочайший интерес и важность, такие как эссе “Кольца Сатурна”, статья “Равновесие упругих твердых тел” и различные мемуары по чистой геометрии и вопросам механики, которые, будь они самостоятельными, обеспечили бы их автору выдающееся положение как физика и математика, но которые не являются теми работами, благодаря которым его имя в основном запомнят.

Работа над “Восприятием цвета” была начата довольно рано. Мы видели, что Максвелл, еще находясь в Эдинбурге, интересовался дискуссиями о теориях Хэя.

Его первой опубликованной работой на эту тему было письмо доктору Г. Уилсону, напечатанное в журнале “Труды Королевского общества искусств” за 1855 год; но до этого он некоторое время смешивал цвета с помощью своего топа, и результаты этих экспериментов приведены в статье, озаглавленной “Эксперименты с цветом”, переданной Эдинбургскому королевскому обществу доктором Грегори и напечатанной в их трудах, том xxi.

В статье “Теория сложных цветов”, напечатанной в “Философских трудах” за 1860 год, Максвелл излагает историю теории в том виде, в каком она была ему известна.

Сначала он указывает на различие между *оптическими* свойствами и *хроматическими* свойствами луча света. “Оптические свойства - это те, которые имеют отношение к его происхождению и распространению в среде до тех пор, пока он не попадет на чувствительный орган зрения”; они зависят от периодов и амплитуд эфирных колебаний, составляющих луч. “Хроматические свойства - это те, которые связаны с его способностью вызывать определенные ощущения цвета, воспринимаемые органом зрения”. Возможно, что два луча могут быть оптически очень разными и хроматически похожими. Обратное неверно; два луча, которые оптически одинаковы, одинаковы и хроматически.

Основы теории сложных цветов были заложены Ньютоном. Сначала он показал, что “путем смешивания однородного света могут быть получены цвета, которые подобны цветам однородного света по внешнему виду цвета, но не по неизменности цвета и строению света”. Два луча, которые отличаются оптически, все же могут быть одинаковыми хроматически; смешивая красный и желтый, можно получить оранжевый цвет, хроматически подобный оранжевому в спектре, но оптически отличный от этого оранжевого, поскольку составной оранжевый может анализироваться призмой на составляющие красный и желтый; оранжевый спектр не поддается дальнейшему разрешению.

Ньютон также решает следующую задачу:—

В смеси основных цветов количество и качество каждого определяется для определения цвета соединения (Оптика, книга 1, часть 2, раздел 6), и его решение заключается в следующем: — Он расположил семь цветов спектра по окружности круга, причем длина, занимаемая каждым цветом, пропорциональна музыкальному интервалу, которому, по взглядам Ньютона, соответствовал цвет. В центр тяжести каждой из этих дуг он помещает груз, пропорциональный количеству лучей соответствующего цвета, которые входят в рассматриваемую смесь. Положение центра тяжести этих гирь указывает на природу получаемого цвета. Радиус, проведенный через этот центр тяжести, указывает на цвет спектра, на который он больше всего похож; расстояние центра тяжести от центра дает полноту цвета. Сам центр белый. Ньютон не приводит никаких доказательств этого правила; он просто говорит: “Я считаю это правило достаточно точным для практики, хотя и не математически точным”.

Максвелл доказал, что метод Ньютона по нахождению центра тяжести составляющих цветов был подтвержден его наблюдениями и что он включает в себя математически теорию трех элементов цвета; но расположение цветов по кругу было лишь предварительным расположением; истинные соотношения цветов можно было определить только прямым экспериментом.

Томас Янг, по-видимому, был следующим после Ньютона, кто работал над теорией цветоощущения. Он проводил наблюдения, вращая цветные диски во многом таким же образом, как тот, который впоследствии был принят Максвеллом, и он разработал теорию о том, что свет может вызывать в глазу три различных первичных ощущения, в то время как цвет любого луча зависит от пропорций, в которых возбуждаются эти три ощущения. Он предполагает, что три первичных ощущения соответствуют красному, зеленому и фиолетовому. Синий луч способен возбуждать как зеленый, так и фиолетовый; желтый луч возбуждает красный и зеленый. Любому цвету, согласно теории Юнга, может соответствовать смесь этих трех основных цветов, взятых в надлежащей пропорции; качество цвета зависит от соотношения интенсивностей компонентов; его яркость зависит от суммы этих интенсивностей.

Эксперименты Максвелла проводились с целью доказательства или опровержения физической части теории Юнга. Он не рассматривает вопрос о том, существуют ли три различных ощущения, соответствующие трем основным цветам; это физиологический вопрос, на который до сих пор не было дано полностью удовлетворительного ответа. Он показывает, что при правильном смешивании любых трех произвольно выбранных стандартных цветов можно сочетать любой другой цвет; однако слова “правильное смешение”, как вскоре появится, нуждаются в некотором развитии.

Мы можем с пользой сравнить эту проблему с проблемой акустики.

Когда звучит сложная музыкальная нота, состоящая из чистого тона и его обертонов, тренированное ухо может различать различные обертоны и анализировать звук на его простые составляющие. Одно и то же ощущение не может быть возбуждено двумя различными способами. Глаз не обладает такой соответствующей способностью. Данный желтый может быть чистым спектрально-желтым, соответствующим чистому тону в музыке, или это может быть смесь ряда других чистых тонов; в любом случае ему может соответствовать правильное сочетание трех стандартных цветов — это доказал Максвелл. Возможно, как и предполагал Янг, что при правильном выборе трех стандартных цветов они в точности соответствуют трем первичным ощущениям мозга. Эксперименты Максвелла не проливают никакого света на этот вопрос, который все еще остается более чем сомнительным.

Когда Максвелл начал свою работу, теория цветов вызывала значительный интерес. Сэр Дэвид Брюстер недавно разработал новую теорию цветоощущения, которая легла в основу некоторых дискуссий, и в 1852 году фон Гельмгольц опубликовал свою первую статью на эту тему. Согласно Брюстеру, тремя примитивными цветами были красный, желтый и синий, и он предположил, что они соответствуют трем различным видам объективного освещения. Гельмгольц указал, что эксперименты до этого времени проводились путем смешивания пигментов, за исключением тех, в которых использовался вращающийся диск, и что необходимо проводить их на лучах самого спектра. Затем он описывает метод смешивания света из двух спектров таким образом, чтобы получить комбинацию каждого двух простых призматических лучей во всех степенях относительной силы.

В результате этих экспериментов были получены результаты, которые в то время были неожиданными, но некоторые из которых, должно быть, были известны Янгу. Среди них было показано, что смесь красного и зеленого дает желтый цвет, в то время как смесь зеленого и фиолетового дает синий.

В более поздней статье (*Philosophical Magazine*, 1854) Гельмгольц описал метод определения различных пар дополнительных цветов — то есть цветов, которые при смешивании дают белый цвет, — существование которых, как было показано Грассманом, если теория Ньютона верна. Он также дал предварительную диаграмму кривой, образованной спектром, которая должна была занять место круга на диаграмме Ньютона; для этого, однако, его эксперименты не дали полных данных.

Таково было состояние вопроса, когда Максвелл начинал. Его первая цветная коробка была изготовлена в 1852 году. Другие были разработаны в 1855 и 1856 годах, а последняя статья появилась в 1860 году. Но до этого он добился важных результатов с помощью своих вращающихся дисков и цветного верха. В своем собственном описании этого он говорит:

“Цветная бумага нарезана в форме дисков, каждый с отверстием в центре и разделен по радиусу таким образом, чтобы несколько из них располагались на одной оси, так что часть каждого остается открытой. Надевая один диск на другой, мы можем отобразить любую заданную часть каждого цвета. Эти диски помещаются на волчок, который быстро вращается. Ось верха проходит через центр дисков, и количество каждого выставленного цвета измеряется с помощью градуировок на ободке верха, который разделен на 100 частей. Когда волчок вращается достаточно быстро, впечатления от каждого цвета в отдельности быстро сменяют друг друга в каждой точке сетчатки и смешиваются вместе; сила впечатления от каждого цвета, как можно показать экспериментально, такая же, как при одновременном попадании в глаз трех видов света в одинаковых относительных пропорциях. Эти относительные пропорции измеряются по площадям различных дисков, которые подвергаются воздействию. Используются два набора дисков разного радиуса; сначала надеваются диски большего размера, затем меньшего, так что центральная часть верха демонстрирует цвет, полученный в результате смешения цветов дисков меньшего размера; внешняя часть - цвет дисков большего размера”.

В эксперименте используются шесть дисков каждого размера: черный, белый, красный, зеленый, желтый и синий. Экспериментальным путем установлено, что соответствие может быть установлено между любыми пятью из них. Таким образом, три диска большего размера помещаются сверху — скажем, черный, желтый и синий, — а два диска меньшего размера, красный и зеленый, располагаются над ними. Затем обнаруживается, что можно таким образом отрегулировать степень обнажения каждого диска, чтобы при вращении две части верха казались одного и того же оттенка. В одной серии экспериментов было обнаружено, что хроматический эффект 46·8 частей черного, 29·1 части желтого и 24·1 части синего такой же, как у 66·6 частей красного и 33·4 части зеленого; каждый набор дисков имеет грязно-желтый оттенок.

Итак, в этом эксперименте черный цвет не является цветом; практически никакой свет не достигает глаз от мертвой черноты. Однако мы должны заполнить окружность верха таким образом, чтобы это не повлияло на впечатление на сетчатке, возникающее от смеси синего и желтого; это мы можем сделать, используя черный диск.

Таким образом, мы показали, что 66·6 частей красного и 33·4 части зеленого дают тот же хроматический эффект, что и 29·1 желтого и 24·1 синего. Аналогичным образом, таким образом можно подобрать сочетание любых четырех цветов и черного, причем черный цвет необходим для завершения окружности дисков.

Таким образом, используя A, B, C, D для обозначения различных цветов, a, b, c, d количество каждого взятого цвета, мы можем получить ряд результатов, выраженных следующим образом: a части A вместе с b части B соответствуют с части C вместе с d части D; или мы можем записать это в виде уравнения таким образом:—

$$a A + b B = c C + d D,$$

где + означает “комбинированный с”, $a = -$ “совпадает по оттенку”.

Мы также можем написать выше—

$$d D = a A + b B - c C,$$

или d части D могут сочетаться с *правильной* комбинацией цветов A, B, C. Знак показывает, что для достижения соответствия мы должны сочетать цвет C с D; затем комбинация соответствует смеси A и B.

Таким образом, мы можем составить ряд уравнений для всех возможных цветов, и если нам захочется взять любые три цвета A, B, C в качестве стандартов, мы получим результат, который можно записать в общем виде —

$$xX = aA + bB + cC,$$

или x части X могут быть сопоставлены с a частями A, объединенными с b частями B и с частями C. Если знак одной из величин a , b или c отрицательный, это указывает на то, что этот цвет должен сочетаться с X, чтобы соответствовать двум другим.

Теперь Максвелл смог показать, что при правильном выборе A, B, C почти любому другому цвету могут соответствовать положительные комбинации этих трех. Таким образом, эти три цвета являются основными, и почти любому другому цвету может соответствовать комбинация трех основных цветов.

Однако эксперименты с цветными дисками, подобные тем, что были предприняты Янгом, Форбсом и Максвеллом, не смогли дать удовлетворительных результатов. Цвета дисков не были цветами чистого спектра и в некоторой степени варьировались в зависимости от природы падающего света. Именно по этой причине Гельмгольц в 1852 году экспериментировал со спектром, а Максвелл примерно в то же время изобрел свой цветной прибор.

Принцип последнего был очень прост. Предположим, у нас есть щель S и некоторое устройство для формирования чистого спектра на экране. Пусть теперь на экране есть щель R, расположенная в красной части спектра. Когда свет падает на щель S, только красные лучи могут достигать R, и, следовательно, наоборот, если источник белого света будет размещен на другом конце устройства, так что R будет освещен белым светом, только красные лучи достигнут S. Аналогично, если поместить другую щель зеленого цвета в точке G, и она будет освещена белым светом, только зеленые лучи достигнут S, в то время как из третьей щели V в фиолетовой области только фиолетовый свет может достигать S. Таким образом, открывая три щели в точке V, G и R одновременно, и смотря через S, сетчатка получает впечатление от трех лучей. разные цвета. Количество света каждого цвета будет зависеть от ширины, на которую открыта соответствующая щель, и относительные интенсивности трех различных компонентов можно сравнить, сравнив ширину трех щелей. Теперь можно подобрать любой другой цвет, которому какое-либо подходящее приспособление позволяет одновременно попадать в глаз, при условии, что красный, зеленый и фиолетовый являются основными цветами.

Посредством экспериментов с цветовой шкатулкой Максвелл убедительно показал, что соответствие может быть получено между любыми четырьмя цветами; эксперименты нельзя было провести достаточно простым способом, предложенным приведенным выше описанием принципа работы шкатулки. Описание метода можно найти в собственной статье Максвелла. Он заключался в подборе стандартного белого цвета к различным комбинациям других цветов.

Однако главной целью его исследований было изучение цветовых свойств различных частей спектра и определение формы кривой, которая должна заменить круг на цветовой диаграмме Ньютона.

Максвелл принял в качестве своих стандартных цветов три: красный, длина волны около 6302; зеленый, длина волны 5281; и фиолетовый, длина волны 4569 десятых метра. На шкале прибора Максвелла они обозначены цифрами 24, 44 и 68.

Возьмем три точки A, B, C в углах равностороннего треугольника, чтобы изобразить на диаграмме эти три цвета. Положение любого другого цвета на диаграмме можно определить, взяв веса, пропорциональные количеству цветов A, B, C, необходимых для соответствия между A, B, C и данным цветом; эти веса помещаются в A, B, C соответственно; положение их центра тяжести является требуемой точкой. Таким образом, положение белого задается уравнением—

$$W = 18 \cdot 6 (24) + 31 \cdot 4 (44) + 30 \cdot 5 (68)$$

это означает, что грузы, пропорциональные $18 \cdot 6$, $31 \cdot 4$ и $30 \cdot 5$, должны быть размещены в точках A, B, C соответственно, и должен быть найден их центр тяжести. Найденная таким образом точка - это положение белого. Любой другой цвет задается уравнением—

$$X = a (24) + b (44) + c (68).$$

Опять же, положение на диаграмме для всех цветов, для которых a , b , c все положительные, находится внутри треугольника A B C. Если один из коэффициентов, скажем, c , отрицателен, применяется та же конструкция, но вес, применяемый в точке C, должен рассматриваться как действующий в направлении, противоположном весу в точках A и B. Смесь данного цвета и C соответствует смеси A и B. Ясно, что точка, соответствующая X, тогда будет находиться за пределами треугольника A B C. Максвелл показал, что с его стандартами почти все цвета могут быть представлены точками внутри треугольника. Цвета, которые он выбрал в качестве стандартов, были очень близки к основным цветам.

И снова он доказал, что любой цвет спектра между красным и зеленым в сочетании с очень небольшой примесью фиолетового может быть подобран, как в случае миссис Максвелл, так и в случае его самого, надлежащей смесью красного и зеленого. Таким образом, положения цветов спектра между красным и зеленым лежат сразу за пределами треугольника A B C, находясь очень близко к линии Ab, в то время как для цветов между зеленым и фиолетовым Максвелл получил кривую, лежащую несколько дальше от стороны B C. Любой цвет спектра между зеленым и фиолетовым вместе с небольшой примесью красного может сочетаться с подходящей смесью зеленого и фиолетового.

Таким образом, круг на диаграмме Ньютона следует заменить кривой, которая очень близко совпадает с двумя сторонами Ab и Bc фигуры Максвелла. Строго говоря, по его наблюдениям, кривая лежит сразу за пределами этих двух сторон. Пурпурные тона спектра расположены почти вдоль третьей стороны треугольника, Ca, и получаются приблизительно путем смешивания фиолетового и красного.

Чтобы найти точку на диаграмме, соответствующую цвету, полученному путем смешивания любых двух или более цветов спектра, мы должны, в соответствии с правилом Ньютона,

разместить грузы в точках, соответствующих выбранным цветам, и найти центр тяжести этих грузов.

Таким, таким образом, был результат работы Максвелла над цветом. Он подтвердил существенную часть конструкции Ньютона и впервые получил истинную форму кривой спектра на диаграмме.

Форма этой кривой, конечно, будет зависеть от глаза отдельного наблюдателя. Таким образом, Максвелл и миссис Максвелл оба проводили наблюдения, и были обнаружены явные различия в их глазах. Однако представляется, что подавляющее большинство людей имеют нормальное зрение, и что совпадения, сделанные одним таким человеком, большинством других воспринимаются как удовлетворительные. Однако некоторые люди страдают дальтонизмом, и Максвелл исследовал нескольких таких людей. У тех, кого он обследовал, создавалось впечатление, что зрение было двухцветным, ощущение красного, казалось, отсутствовало; почти ко всем цветам можно было подобрать сочетания зеленого и фиолетового. Цветовая диаграмма была сокращена до прямой линии В С. С тех пор были исследованы другие формы дальтонизма.

Присуждая Максвеллу медаль Румфорда в 1860 году, генерал-майор Сабин, вице-президент Королевского общества, объяснив теорию цветового зрения и возможный метод ее проверки, сказал: “Профессор Максвелл подверг теорию этой проверке и тем самым возвел состав цветов в ранг раздела математической физики”, и он продолжает: “Исследования, за которые присуждается медаль Румфорда, приводят к замечательному результату, что с очень близкой степенью приближения все цвета спектра, и, следовательно, все цвета в природе, которые являются лишь их смесями, могут быть идеально воспроизведены”. имитируется смесями трех реально достижимых цветов, которыми являются красный, зеленый и синий, принадлежащие соответственно к трем определенным частям спектра”.

Завершая наши замечания по этой части работы Максвелла, следует отметить, что его результаты носят чисто физический характер. Они не противоречат физиологической части теории Юнга, а именно тому, что существуют три первичных ощущения цвета, которые могут передаваться в мозг, и что цвет любого объекта зависит от относительных пропорций, в которых возбуждаются эти ощущения, но они не доказывают эту теорию. Любая физиологическая теория, которая может быть принята как истинная, должна объяснять наблюдения Максвелла, и теория Юнга делает это; но, конечно, возможно, что другие теории могут объяснить их столь же хорошо и в большей степени соответствовать физиологическим наблюдениям, чем теория Юнга. Максвелл дал нам физические факты, которые должны быть объяснены; остальное должны сделать физиологи.

ГЛАВА VIII.

НАУЧНАЯ РАБОТА—МОЛЕКУЛЯРНАЯ ТЕОРИЯ.

Максвелл в своей статье “Атом” в девятом издании *Британской энциклопедии* дал некоторый отчет о современной молекулярной науке, и в частности о молекулярной теории газов. Основателями этой науки являются Клаузиус и Максвелл, хотя недавно было показано, что к их именам следует добавить третье - Уотерстона. В настоящей главе предполагается в общих чертах описать вклад Максвелла в молекулярную науку и объяснить успехи, которыми он обязан.

Учение о том, что тела состоят из мелких частиц, находящихся в быстром движении, очень древнее. Его основателем был Демокрит, Лукреций — *de Rerum Natura* - объяснил его принципы. Атомы не заполняют пространство; между ними есть пустота.

“Quapropter locus est intactus inane vacansque,

Quod si non esset, nullâ ratione moveri

Res possent; namque officium quod corporis extat

Officere atque obstare, id in omni tempore adesset

Omnibus. Haud igitur quicquam procedere posset

Principium quoniam cedendi nulla daret res.”

Согласно Босковичу, атом - это неделимая точка, имеющая положение в пространстве, способная двигаться и обладающая массой. Он также наделен способностью оказывать силовое воздействие, так что два атома притягивают или отталкивают друг друга с силой, зависящей от их расстояния друг от друга. У него нет частей или измерений: это простая геометрическая точка, не имеющая протяженности в пространстве; он не обладает свойством непроницаемости, поскольку предполагается, что два атома могут существовать в одной и той же точке.

В современной молекулярной науке, согласно Максвеллу, “мы начинаем с предположения, что тела состоят из частей, каждая из которых способна двигаться, и что эти части воздействуют друг на друга способом, согласующимся с принципом сохранения энергии. Делая эти предположения, мы руководствуемся фактами, что тела могут быть разделены на более мелкие части и что все тела, с которыми мы знакомы, представляют собой консервативные системы, чего не было бы, если бы их части также не были консервативными системами.

Мы также можем предположить, что эти маленькие части находятся в движении. Это самое общее предположение, которое мы можем сделать, поскольку оно включает в себя в качестве частного случая теорию о том, что маленькие части находятся в состоянии покоя. Явления диффузии газов и жидкостей друг через друга показывают, что могут иметь место движения малых частей тела, которые не воспринимаются нами.

“Мы не делаем никаких предположений относительно природы мелких деталей — имеют ли они все одну величину. Мы даже не предполагаем, что они имеют протяженность и форму. Каждый из них должен быть измерен своей массой, и любые два из них должны, подобно видимым

телам, обладать способностью воздействовать друг на друга, когда они приближаются для этого достаточно близко. Свойства тела или среды определяются конфигурацией его частей”.

Эти маленькие частицы называются молекулами, а молекула в ее физическом аспекте была определена Максвеллом в следующих терминах:—

“Молекула вещества - это маленькое тело, такое, что если бы, с одной стороны, несколько похожих молекул были собраны вместе, они образовали бы массу этого вещества; в то время как, с другой стороны, если бы какая-либо часть этой молекулы была удалена, она больше не смогла бы вместе с совокупностью других молекул, обработанных аналогичным образом, составлять массу исходного вещества”.

Мы должны рассматривать газ как совокупность молекул, разлетающихся во всех направлениях. Путь любой молекулы представляет собой прямую линию, за исключением того времени, когда она находится под действием соседней молекулы; это время обычно мало по сравнению с тем, в течение которого она свободна.

Самая простая теория, которую мы могли бы сформулировать, заключалась бы в том, что молекулы ведут себя как упругие сферы, и что действие между любыми двумя молекулами представляет собой столкновение в соответствии с законами, которые, как мы знаем, применимы к столкновению упругих тел. Если среднее расстояние между двумя молекулами велико по сравнению с их размерами, то время, в течение которого любая молекула находится в состоянии столкновения, будет небольшим по сравнению с интервалом между столкновениями, и это соответствует только что упомянутому фундаментальному предположению. Однако нет необходимости предполагать, что столкновение двух молекул является столкновением. Одна молекула может воздействовать на другую с силой, которая зависит от расстояния между ними, такого характера, что эта сила не ощущается, за исключением случаев, когда молекулы расположены очень близко друг к другу.

Нетрудно понять, как давление, оказываемое газом на стенки сосуда, в котором он находится, может быть объяснено исходя из этого предположения. Каждая молекула, ударяясь о борт, имеет обратный импульс — здесь предполагается, что молекулы идеально эластичны.

Таким образом, каждая молекула газа постоянно набирает импульс от стенок сосуда, в то время как она передает сосуду тот импульс, которым обладала до удара. Скорость, с которой это изменение импульса происходит в данной области, измеряет силу, действующую на эту область; давление газа - это скорость изменения импульса на единицу площади поверхности.

Опять же, можно показать, что это давление пропорционально произведению массы каждой молекулы, количества молекул в единице объема и квадрата скорости молекул.

Рассмотрим в первую очередь случай струи песка или воды единичного поперечного сечения, которая ударяется о поверхность. Предположим пока, что все молекулы, ударяющиеся о поверхность, имеют одинаковую скорость.

Тогда количество молекул, которые ударяются о поверхность в секунду, будет пропорционально этой скорости. Если частицы движутся быстро, они могут достичь поверхности за одну секунду с большего расстояния, чем это возможно при медленном движении. Опять же, количество молекул, достигающих поверхности, будет пропорционально количеству молекул на единицу

объема. Следовательно, если мы назовем v скоростью каждой частицы, а N - количеством частиц на единицу объема, число частиц, которые ударяются о поверхность за одну секунду, будет равно $N v$; если m - масса каждой молекулы, масса, которая ударяется о поверхность в секунду, равна $N m v$; the velocity of each particle of this mass is v , therefore the momentum destroyed per second by the impact is $N m v \times v$, или $N m v^2$, и это измеряет давление.

Следовательно, в этом случае, если p - давление

$$p = N m v^2.$$

В приведенном выше примере мы предполагаем, что все молекулы в струе движутся со скоростью v перпендикулярно поверхности. В случае скопления молекул, летающих в замкнутом пространстве, это явно неверно. Молекулы могут ударяться о поверхность в любом направлении; не все они будут двигаться перпендикулярно поверхности. Чтобы упростить случай, рассмотрим кубическую коробку, заполненную газом. Коробка имеет три пары равных граней, расположенных под прямым углом. Мы можем предположить, что одна треть частиц движется под прямым углом к каждой грани, и в этом случае количество частиц на единицу объема, которое мы должны учитывать, равно не N , а $\frac{1}{3} N$. Следовательно, формула становится $p = \frac{1}{3} N m v^2$.,,

Более того, если ρ — плотность газа, то есть масса единицы объема, то Nm равно ρ , поскольку m — масса каждой частицы, а в единице объема находится N частиц.

Следовательно, наконец, $p = \frac{1}{3} \rho v^2$.

Или, опять же, если V - объем единицы массы газа, то ρV равно единице, или ρ равно $1/V$.

Следовательно, $pV = \frac{1}{3} v^2$.

Формулы, эквивалентные этим, по-видимому, впервые были получены Херапатом примерно в 1816 году ("Анналы философии" Томсона, 1816). Однако результаты были представлены только в том году. Документ, в котором была предпринята попытка их обоснования, был представлен Королевскому обществу в 1820 году. Это вызвало очень значительную переписку и было изъято автором до того, как было прочитано. Полностью это напечатано в "Анналах философии" Томсона за 1821 год, том i, стр. 273, 340, 401. Аргументы автора, без сомнения, открыты для критики и во многих пунктах далеки от здравого смысла. Тем не менее, рассматривая проблему столкновения большого количества твердых тел, он пришел к формуле, связывающей давление и объем данной массы газа, эквивалентные только что заданным. Эти результаты содержатся в Предложениях viii. и ix. статьи Херапата.

Однако в своем следующем шаге Хирепат, как мы теперь знаем, ошибся. Одно из его фундаментальных предположений состоит в том, что температура газа измеряется импульсом каждой из его частиц. Следовательно, предполагая это, мы имеем $T = m v$, если T представляет температуру: и

$$p = \frac{1}{3} N m v^2 = \frac{1}{3} (N/m) (m v)^2.$$

Или, опять же, —

$$p = \frac{1}{3} N \cdot T \cdot v = \frac{1}{3} \cdot (N/m) \cdot T^2.$$

Эти результаты практически приведены в Предложении viii., Корр. (1) и (2), и предложение ix.⁴⁹ Температура, определенная таким образом Херапатом, является абсолютной температурой, и он вычисляет абсолютный ноль температуры, при которой газ не имел бы объема, исходя из приведенных выше результатов. Фактический расчет, конечно, неверен, поскольку, как мы теперь знаем из эксперимента, давление пропорционально температуре, а не ее квадрату, как предполагал Хирепат. Однако будет видно, что формула Херапата дает закон Бойля; ибо, если температура постоянна, формула эквивалентна

$pV = \text{постоянная величина.}$

Херапат несколько расширил свою работу в своей “Математической физике”, опубликованной в 1847 году, и применил свои принципы для объяснения диффузии, связи между удельной теплоемкостью и атомным весом, а также других свойств тел. Однако он по-прежнему придерживался своего ошибочного предположения, что температуру следует измерять по импульсу отдельных частиц.

Следующий шаг в теории был сделан Уотерстоном. Его доклад был прочитан в Королевском обществе 5 марта 1846 года. К сожалению, она была передана в Архив Общества и была извлечена лордом Рэлеем только в 1892 году и напечатана в журнале Transactions за тот год.

В только что приведенном изложении теории предполагалось, что все частицы движутся с одинаковой скоростью. В газе это явно не так. Если бы при запуске все частицы имели одинаковую скорость, столкновения изменили бы это положение дел. Некоторые частицы будут двигаться быстро, некоторые медленно. Мы можем, однако, применять теорию разделения частиц на группы, и, если предположить, что каждая группа имеет постоянной скоростью, частицы в данной группе будут способствовать давлению сумму— p_1 —равная $\frac{1}{2} N_1 m v_1^2$, где v_1 скорость группы и N_1 число частиц, имеющих скорости. Полное давление будет найдено путем сложения значений различных групп и, как и раньше, будет задано через $p = \frac{1}{2} N m \bar{v}^2$, where $\bar{v}$ - теперь не фактическая скорость частиц, а средняя скорость, заданная уравнением.....

$$N \bar{v}^2 = n_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots,$$

который будет создавать такое же давление, какое возникает в результате реальных ударов. Эта величина $\bar{v}^2$ известна как *среднеквадратичное значение* молекулярной скорости, и именно так ее использует Уотерстон.

В статье в *Philosophical Magazine* за 1858 год Уотерстон дает отчет о своей собственной статье 1846 года в следующих выражениях: “Мистер Хирепат, к сожалению, предположил, что тепло или температура представлены простым отношением скорости, а не квадратом скорости, будучи при этом явно сбивым с толку общепринятым определением движения, и, таким образом, потерпел неудачу в своих попытках согласовать свою теорию с наблюдениями. Если мы внесем это изменение в определение тепла, или температуру, предложенное мистером Хирепатом, а именно, что оно пропорционально видимой или квадратичной скорости движущейся частицы, а не импульсу или простому отношению скорости, мы сможем без особого труда вывести не только основные законы упругости жидкостей, но и другие физические свойства газов, перечисленные выше в третьем возражении против гипотезы Ньютона. [Статья, из которой взята цитата, посвящена ‘Теории звука’.] В Архиве Королевского общества за 1845-46 годы есть статья ‘Физика сред, состоящих из совершенно “Упругих

молекул в состоянии движения””, которая содержит синтетические рассуждения, на которых основывается демонстрация этих вопросов.... Эта теория не учитывает размер молекул. Предполагается, что при ударе не теряется время и что, если удары приводят к вращательному движению, вложенная таким образом визивная способность имеет постоянное соотношение к прямолинейной визивной способности, чтобы не требовать отдельного рассмотрения. Это также не учитывает вероятное внутреннее движение составных молекул; однако результаты настолько точно согласуются с наблюдениями во всех областях предмета, что не оставляют сомнений в том, что идея мистера Хирепата о физическом строении газов близко к истине”.

В своем введении к статье Уотерстона (Фил. Пер., 1892) Лорд Рэлей пишет: “Впечатленный приведенным выше отрывком и общей изобретательностью и обоснованностью взглядов Уотерстона, я воспользовался первой возможностью обратиться к архивам и сразу увидел, что мемуары оправдывают большие претензии, предъявляемые к ним, и что они знаменуют огромный прогресс в направлении общепринятой в настоящее время теории”.

В первом разделе статьи большой прогресс Уотерстона заключался в утверждении, что средний квадрат кинетической энергии каждой молекулы измеряет температуру.

В соответствии с этим мы должны, таким образом, ввести в уравнение давления $\frac{1}{2} m v^2 = T$, температуру, и мы сразу получим $p V = \frac{2}{3} N \cdot T$.

Теперь это уравнение выражает, как мы знаем, законы Бойля и Гей-Люссака.

Во втором разделе обсуждаются свойства сред, состоящих из двух или более газов, и делается вывод о том, что “в смешанных средах среднеквадратичная скорость молекул обратно пропорциональна удельным весам молекул”. Это был великий закон, заново открытый Максвеллом пятнадцать лет спустя. В современной нотации это можно сформулировать следующим образом:—если m_1, m_2 быть масса каждой молекулы из двух разных наборов молекулы смешиваются, затем, когда устойчивое состояние достигнуто, поскольку температура одинаковая по всей длине, $m_1 v_1^2$ равна $m_2 v_2^2$. Средняя кинетическая энергия каждой молекулы одинакова.

Из этого сразу следует закон Авогадро, ибо если p_1, p

$$p_1 = \frac{1}{3} N_1 m_1 v_1^2, p_2 = \frac{1}{3} N_2 m_2 v_2^2.$$

Следовательно, если p_1 , равна p_2 , с $m_1 v_1^2$ равна $m_2 v_2^2$, мы должны иметь N_1 равна N_2 , или число молекул в равных объемах двух газов при одинаковых температуре и давлении—это же самое. Доказательство этого утверждения, приведенное Уотерстоном, неудовлетворительно. Однако по этому вопросу нам есть что сказать еще. Третий раздел статьи посвящен адиабатическому расширению, и в нем допущена ошибка в расчетах, которая помешала получить правильные результаты.

На собрании Британской ассоциации в Ипсвиче в 1851 году был зачитан доклад Дж. Дж. Уотерстона из Бомбея “Общая теория газов”. Ниже приводится выдержка из материалов дела:—

Автор “предполагает, что атомы газа, будучи совершенно упругими, находятся в непрерывном движении во всех направлениях, будучи стесненными в ограниченном пространстве своими столкновениями друг с другом и с частицами окружающих тел.

“Видимость этих движений в данной части газа составляет количество тепла, содержащегося в нем.

“Он показывает, что результатом такого состояния движения должно быть придание газу упругости, пропорциональной среднему квадрату скорости движения молекул и общей массе атомов, содержащихся в единице объема” (единица объема), то есть плотности среды.

“Эластичность данного газа является мерой температуры. Равновесие давления и тепла между двумя газами имеет место, когда количество атомов в единице объема равно и видимость каждого атома равна. Следовательно, температура во всех газах пропорциональна массе одного атома, умноженной на средний квадрат скорости движения молекул, и измеряется от абсолютного нуля на 491 ° ниже нуля термометра по Фаренгейту”.

Таким образом, из этих выдержек следует, что открытием законов, согласно которым температура измеряется средней кинетической энергией отдельной молекулы и что в смеси газов средняя кинетическая энергия каждой молекулы одинакова для каждого газа, обязан Уотерстон. Они содержались в его статье 1846 года и были опубликованы им в 1851 году. Однако обе эти статьи, по-видимому, оставались незамеченными всеми последующими авторами до 1892 года.

Между тем, в 1848 году эксперименты Джоуля привлекли внимание к этому вопросу, и он увидел, что результат Херапата дает возможность вычислить среднюю скорость молекул газа. Ибо согласно приведенному выше результату, $p = \frac{1}{3} \rho v^2$; таким образом, $v^2 = 3 p / \rho$, и, поскольку известны p и ρ , мы находим v^2 . Таким образом, для водорода при температуре замерзания и атмосферном давлении Джоуль получает для v значение 6055 футов в секунду, или, примерно, в шесть раз превышающее скорость звука в воздухе.

Клаузиус был следующим важным автором на эту тему. Его первая статья опубликована в “Анналах Поггендорфа”, том 1857 г., “О виде движения, которое мы называем теплом”. В ней дается изложение теории и устанавливается тот факт, что кинетическая энергия поступательного движения молекулы не отражает всего тепла, которое она содержит. Если мы рассматриваем молекулу как маленькое твердое тело, мы должны учитывать энергию, которой она обладает в результате своего вращения вокруг центра тяжести, а также энергию, обусловленную перемещением целого.

Вторая статья Клаузиуса появилась в 1859 году. В ней он рассматривает среднюю длину пути молекулы за интервал между двумя столкновениями. Он определяет этот путь в терминах среднего расстояния между молекулами и расстояния между центрами двух молекул в момент, когда происходит столкновение.

Эти две статьи, по-видимому, привлекли внимание Максвелла к этому вопросу, и его первая статья, озаглавленная “Иллюстрации динамической теории газов”, была прочитана Британской

ассоциации в Абердине и Оксфорде в 1859 и 1860 годах и появилась в *Philosophical Magazine* в январе и июль 1860 года.

Во введении к этой статье Максвелл указывает, что, хотя в то время не существовало средств измерения величин, которые имели место в выражении Клаузиуса для средней длины свободного пробега, “явления внутреннего трения газов, теплопроводности через газ и диффузии одного газа через другой, по-видимому, указывают на возможность точного определения средней длины пути, который частица описывает между двумя столкновениями. Поэтому, чтобы заложить основу таких исследований на строгих механических принципах, ” продолжает он, “ я продемонстрирую законы движения неопределенного числа маленьких, твердых и совершенно эластичных сфер, действующих друг на друга только при ударе”.

Затем Максвелл переходит к рассмотрению в первом случае взаимодействия двух сфер.

Но газ состоит из неопределенного числа молекул. Сейчас невозможно разобраться с каждой молекулой в отдельности, проследить ее историю и проследить ее путь. Поэтому, чтобы избежать этой трудности, Максвелл ввел статистический метод решения таких проблем, и это введение является первым большим шагом в молекулярной теории, с которым связано его имя.

К этому методу его привело исследование теории колец Сатурна, которое было завершено в 1856 году и в котором он показал, что условия стабильности требуют предположения, что кольца состоят из неопределенного числа свободных частиц, вращающихся вокруг планеты со скоростями, зависящими от их расстояния от центра. Эти частицы могут быть либо расположены отдельными кольцами, либо их движение может быть таким, что они постоянно сталкиваются друг с другом.

В качестве примера статистического метода рассмотрим толпу людей, движущуюся по улице. Взятая в целом, толпа неуклонно движется вперед. Однако любого человека в толпе толкают взад-вперед и из стороны в сторону; если бы поперек улицы была проведена линия, мы бы обнаружили людей, пересекающих ее в обоих направлениях. Через значительный промежуток времени ее пересекло бы больше людей, идущих в том направлении, в котором движется толпа, чем в другом, и скорость движения толпы можно было бы оценить, подсчитав число людей, пересекших линию за данный промежуток времени. Эта найденная таким образом скорость сильно отличалась бы от скорости любого индивидуума, которая может иметь любое значение в определенных пределах и которая постоянно меняется. Если бы мы знали скорость каждого индивидуума и количество индивидуумов, мы могли бы вычислить среднюю скорость, и это соответствовало бы значению, полученному путем подсчета результирующего количества людей, пересекших черту за данный интервал.

Опять же, люди в толпе естественным образом делятся на группы в соответствии со своей скоростью. В любой момент найдется определенное количество людей, скорости которых практически равны, или, если быть более точным, различаются между собой не более чем на какую-то небольшую величину. Количество людей в любой момент в каждой из этих групп будет сильно отличаться. Число в любой группе, скорость которой не сильно отличается от средней скорости целого, будет большим; сравнительно немногие будут иметь либо очень большую, либо очень маленькую скорость.

Опять же, в любой момент люди переходят из одной группы в другую; человека останавливает какое-нибудь препятствие, и его скорость значительно изменяется — он переходит из одной

группы в другую; но пока это так, если средняя скорость остается постоянной, а размер толпы очень велик, количество людей в любой момент в данной группе остается неизменным. Люди переходят из этой группы в другие, но в течение любого интервала то же самое число снова переходит в эту группу.

Ясно, что если это условие выполняется, то распределение является устойчивым, и толпа будет продолжать двигаться с той же равномерной средней скоростью.

Теперь Максвелл применяет эти соображения к скоплению идеально упругих сфер, которые так или иначе движутся в замкнутом пространстве и действуют друг на друга только при соприкосновении. Он показывает, что их можно разделить на группы в соответствии с их скоростями, и что при достижении устойчивого состояния численность в каждой группе останется прежней, хотя особи изменятся. Более того, показано, что, если А и В представляют любые две группы, состояние будет устойчивым только тогда, когда числа, которые переходят из группы А в группу В, равны числам, которые возвращаются из группы В в группу А. Это условие в сочетании с тем фактом, что общая кинетическая энергия движения остается неизменной, позволяет ему вычислить количество частиц в любой группе в терминах общего числа частиц, средней скорости и фактической скорости группы.

Исходя из этого, можно найти точное выражение для давления газа, и доказано, что значение, найденное другими исследователями в предположении, что все частицы двигались с общей скоростью, является правильным. До этой статьи Максвелла было понятно, что скорости не могут быть повсюду одинаковыми. Не было предпринято никаких попыток определить распределение скорости или подвергнуть задачу вычислениям с учетом изменений скорости.

Математические методы Максвелла по своей общности и элегантности намного превосходят все, что ранее предпринималось в этой области.

До сих пор предполагалось, что все частицы в сосуде одинаковы. Затем Максвелл рассматривает случай смеси двух видов частиц и спрашивает, какое соотношение должно существовать между средними скоростями этих различных частиц, чтобы состояние могло быть устойчивым.

Теперь можно показать, что при столкновении двух упругих сфер эффект удара всегда таков, что уменьшает разницу между их кинетическими энергиями.

Следовательно, после очень большого количества ударов кинетические энергии двух шаров должны быть одинаковыми; тогда устойчивое состояние будет достигнуто, когда каждый шар будет обладать одинаковой кинетической энергией.

Таким образом, если m_1 , m_2 — массы частиц в двух наборах соответственно, v_1 , v_2 - их средние скорости, мы должны иметь, наконец, -

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

Это второй из двух великих законов, провозглашенных Уотерстоном в 1845 и 1851 годах, но который, как мы видели, оставался неизвестным до 1859 года, когда он был снова дан Максвеллом.

Теперь, когда газы смешиваются, их температуры становятся равными. Отсюда мы заключаем, по словам Максвелла, “что физическое условие, определяющее, что температура двух газов должна быть одинаковой, заключается в том, что средняя кинетическая энергия перемешивания отдельных молекул двух газов одинакова”.

Таким образом, в результате более точных исследований Максвелла движения системы сферических частиц мы обнаруживаем, что снова можем получить уравнения —

$$T = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \quad p = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2 = \frac{2}{3} NT = \frac{2}{3} \rho T/m$$

Из этих результатов мы получаем, как и прежде, законы Бойля, Чарльза и Аврорагадро.

Опять же, если σ - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, то количество тепла, необходимое для поднятия одной молекулы массой m на один градус, будет составлять σm .

Таким образом, при нагревании молекулы кинетическая энергия должна увеличиваться на эту величину. Но повышение температуры, которое в данном случае составляет 1° , измеряется увеличением кинетической энергии отдельной молекулы. Следовательно, количество тепла, необходимое для повышения температуры одной молекулы всех газов на 1° , одинаково. Таким образом, величина σm одинакова для всех газов; или, другими словами, удельная теплоемкость газа обратно пропорциональна массе его отдельных молекул. Плотность газа — поскольку количество молекул на единицу объема при данном давлении и температуре одинаково для всех газов — также пропорциональна массе каждой отдельной молекулы. Таким образом, удельная теплоемкость всех газов обратно пропорциональна их плотности. Этот закон, экспериментально открытый Дюлонгом и Пети, приблизительно справедлив для большого числа веществ.

* * * * *

В следующей части статьи Максвелл приступил к определению среднего числа столкновений за данное время и, следовательно, зная скорости, определил в терминах размера частиц и их количества среднюю длину свободного пробега частицы; полученный таким образом результат несколько отличался от того, который уже был получен Клаузиусом.

Сделав это, он показал, как с помощью экспериментов по вязкости газов можно определить длину свободного пробега.

Иллюстрация, сделанная профессором Бальфуром Стюартом, возможно, прояснит это. Предположим, у нас есть два поезда, движущихся с одинаковой скоростью в противоположных направлениях по параллельным линиям, и, далее, что двигатели продолжают работать с одинаковой скоростью, вырабатывая ровно столько энергии, чтобы преодолеть сопротивление линии и т.д., и поддерживать скорость постоянной. Теперь предположим, что пассажиры начинают перепрыгивать с одного поезда на другой. Каждый человек несет с собой свой собственный импульс, который направлен в направлении, противоположном направлению движения поезда, в который он запрыгивает; в результате этого процесса импульс каждого поезда уменьшается; скорости обоих поездов уменьшаются; создается впечатление, что между ними действует сила трения. Максвелл предполагает, что аналогичный процесс будет учитывать кажущуюся вязкость газов.

Рассмотрим два потока газа, движущихся в противоположных направлениях один над другим; обнаружено, что в каждом случае слои газа вблизи разделяющей поверхности движутся медленнее, чем слои газа внутри потоков; по-видимому, между двумя потоками вдоль этой поверхности существует сила трения, имеющая тенденцию уменьшать их относительную скорость. Объяснение Максвелла этого состоит в том, что на общей поверхности частицы из одного потока попадают в другой и уносят с собой свой собственный импульс; таким образом, вблизи этой поверхности импульс каждого потока уменьшается, точно так же, как импульс поездов уменьшается из-за того, что люди перепрыгивают через них. Внутреннее трение, или вязкость, возникает из-за распространения импульса по этой общей поверхности. Эффект не проникает далеко в газ, поскольку частицы вскоре приобретают скорость потока, в который они попали.

Теперь скорость, с которой распространяется импульс, будет измерять силу трения и будет зависеть от средней длины свободного пробега частиц. Если это значение велико, так что в среднем частица может проникнуть на значительное расстояние во второй газ, прежде чем произойдет столкновение и изменится ее движение, вязкость будет значительной; если, с другой стороны, длина свободного пробега мала, верно обратное. Таким образом, можно получить соотношение между средней длиной свободного пробега и коэффициентом вязкости, и исходя из этого, если известен коэффициент вязкости, можно найти значение средней длины свободного пробега.

Максвелл в обсуждаемой статье был первым, кто сделал это, и, используя значение, найденное профессором Стоксом для коэффициента вязкости, получил как длину среднего свободного пробега молекул воздуха $1/447000$ дюйма, в то время как число столкновений в секунду, испытываемых каждой молекулой, составляет около 8 077 200 000.

Более того, из его теории следовало, что коэффициент вязкости не должен зависеть от количества присутствующих молекул газа, чтобы он не изменялся при изменении плотности. Этот результат Максвелл охарактеризовал как поразительный, и несколько лет спустя он провел сложную серию экспериментов, чтобы проверить его. Причина такого результата станет понятной, если мы вспомним, что при уменьшении плотности увеличивается средняя длина свободного пробега; тогда относительно общего числа присутствующих молекул увеличивается число, которое пересекает поверхность за данное время. И из результата Максвелла следует, что это относительное увеличение таково, что общее число пересечений остается неизменным. Следовательно, импульс, передаваемый через каждую единицу площади в секунду, остается неизменным, несмотря на уменьшение плотности.

Другим следствием того же исследования является то, что коэффициент вязкости пропорционален средней скорости молекул. Поскольку абсолютная температура пропорциональна квадрату скорости, из этого следует, что коэффициент вязкости пропорционален квадратному корню из абсолютной температуры.

Вторая часть статьи посвящена процессу диффузии двух или более видов движущихся частиц друг между другом.

Если два разных газа поместить в два сосуда, разделенных пористой мембраной, такой как кусок неглазурованной фаянсовой посуды, или соединенных узкой трубкой, Грэм показал, что по истечении достаточного времени они смешиваются вместе. Тот же процесс происходит,

когда два газа разной плотности помещаются вместе в один сосуд. Сначала более плотный газ может находиться внизу, а менее плотный наверху, но через некоторое время обнаруживается, что оба газа равномерно распределены по всей поверхности.

Максвелл попытался рассчитать на основе своей теории скорость, с которой происходит диффузия в этих случаях. Условия большинства экспериментов Грэхема были слишком сложными, чтобы допустить прямое сравнение с теорией, из которой следовало, что существует связь между длиной свободного пробега и скоростью диффузии. Однако был найден один эксперимент, условия которого можно было сделать предметом расчета, и из него Максвелл получил в качестве значения средней длины свободного пробега в воздухе $1/389000$ дюйма.

Это число было достаточно близко к тому, которое было получено по вязкости, чтобы дать некоторое подтверждение его теории.

Однако несколько лет спустя Клаузиус раскритиковал детали этой части статьи, а Максвелл в своих мемуарах 1866 года признает, что расчеты были ошибочными. Основные принципы остались неизменными, молекулы переходят из одного газа в другой, и это представляет собой диффузию.

Теперь предположим, что у нас есть два набора частиц, находящихся в контакте такой природы, что средняя кинетическая энергия одного набора отличается от кинетической энергии другого; тогда температуры двух частиц будут разными. Эти два набора будут диффундировать друг в друга, и диффундирующие частицы будут уносить с собой свою кинетическую энергию, которая будет постепенно переходить от тех, которые имеют большую энергию, к тем, которые имеют меньшую, пока средняя кинетическая энергия повсюду не выровняется. Но кинетическая энергия перемещения - это тепло частиц. Эта диффузия кинетической энергии является диффузией тепла за счет проводимости, и здесь мы имеем дело с механической теорией теплопроводности в газе.

Максвелл получил выражение, которое, однако, впоследствии модифицировал, для проводимости газа в терминах длины свободного пробега. Из этого следовало, что проводимость воздуха составляла лишь около $1/7000$ от проводимости меди.

Таким образом, диффузия газов, вязкость газов и теплопроводность газов связаны с диффузией частиц, несущих с собой свои импульсы и энергию; в то время как значения средней длины свободного пробега могут быть получены из наблюдений за любым из этих свойств.

В третьей части своей статьи Максвелл рассматривает последствия предположения, что частицы не являются сферическими. В этом случае удары приводили бы к возникновению вращательного движения в частицах. Направление силы, действующей на любую частицу при ударе, не обязательно будет проходить через ее центр; таким образом, при ударе скорость ее центра будет изменена, и, кроме того, частицы будут вращаться. Следовательно, некоторая часть энергии частиц проявится в виде энергии поступательного движения их центров, в то время как остальная часть примет форму энергии вращения каждой частицы вокруг своего центра.

Из работы Максвелла следует, что для каждой частицы среднее значение этих двух порций энергии было бы равным. Общая энергия будет наполовину поступательной, наполовину вращательной.

Эта теорема в более общей форме, которая была ей впоследствии придана, вызвала много дискуссий и будет снова рассмотрена позже. Пока мы предположим, что она верна. Клаузиус уже привлек внимание к тому факту, что часть энергии должна быть вращательной, если только молекулы не являются гладкими сферами, и привел некоторые основания для предположения, что отношение всей энергии к энергии перемещения в устойчивом состоянии является постоянной величиной. Максвелл показывает, что для твердых тел эта постоянная равна 2. Обозначим ее пока символом β . Таким образом, если поступательная энергия молекулы равна $\frac{1}{2} m v^2$, its whole energy is $\frac{1}{2} \beta m v^2$.,,,,,,,,

Температура по-прежнему измеряется поступательной энергией, или $\frac{1}{2} m v^2$; теплота зависит от всей энергии. Следовательно, если H представляет количество тепла, измеряемое как энергия, содержащаяся в одной молекуле, и T ее температуру, мы имеем —

$$H = \beta T$$

Из этого можно показать⁵⁰, что если γ представляет собой отношение удельной теплоемкости газа при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме, то—

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{1}{(\gamma - 1)}$$

Было показано, что для воздуха и некоторых других газов значение γ равно 1.408. Из этого следует, что $\beta = 1.634$. Теория Максвелла требовала, чтобы для гладких твердых частиц, приблизительно сферической формы, β было равно 2, и, следовательно, он заключает: “Мы показали, что система таких частиц не может удовлетворять известному соотношению между двумя удельными теплотами всех газов”.

С тех пор, как было сделано это заявление, было проведено еще много экспериментов по определению значения γ ; оно не равно 1.408 для всех газов. Следовательно, значение β различно для различных газов.

Важно отметить, что значение β , только что найденное для воздуха, составляет очень приблизительно 1.66 или $5/3$.

Для паров ртути значение γ , как показал Кундт, равно 1.33 или $1\frac{1}{3}$, и, следовательно, β равно 1. Таким образом, вся энергия частицы паров ртути является поступательной, и ее поведение в этом отношении согласуется с предположением, что частица паров ртути представляет собой гладкую сферу.

Два результата этой теории, которые, казалось, легче всего поддавались экспериментальной проверке, заключались в том, что (1) вязкость газа не зависит от его плотности и (2) что она пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры. Следующей работой, связанной с теорией, была попытка проверить эти следствия, и описание экспериментов было опубликовано в “Philosophical Transactions” за 1865 год в статье “Вязкость или внутреннее трение воздуха и других газов”, которая стала лекцией Бакериана за тот год.

Первый результат был полностью доказан. Показано, что значение коэффициента ⁵¹ вязкости “одинаково для воздуха при давлении 0.5 дюймов и при давлении 30 дюймов при условии, что температура остается неизменной”.

Также было ясно, что вязкость зависит от температуры, и результаты экспериментов, по-видимому, показали, что она почти пропорциональна абсолютной температуре. Таким образом, для двух температур - 185° F по Фаренгейту. и 51 ° по Фаренгейту, отношение двух найденных коэффициентов составило 1.2624; отношение двух температур, каждая из которых измерена от абсолютного нуля, равно 1.2605.

Таким образом, этот результат не согласуется с гипотезой о том, что газ состоит из сферических молекул, действующих только друг на друга посредством своего рода удара, ибо, если бы это было так, коэффициент, как мы видели, зависел бы от квадратного корня из абсолютной температуры. Но результат Максвелла, связывающий вязкость с первой степенью абсолютной температуры, не был подтвержден другими исследователями. В соответствии с этим мы должны иметь в качестве соотношения между μ , коэффициентом вязкости при t° и μ_0 , что при нуле уравнение—

$$\mu = \mu_0 (1 + 0,00365 t).$$

Самые последние результаты профессора Холмана (*Философский журнал*, том xxi, стр. 212) дают—

$$\mu = \mu_0 (1 + .00275 t - .00000034 t^2).$$

И результаты, аналогичные этому, приведены О. Э. Мейером, Пулужем и Обермейером. Коэффициент Максвелла · 00365 слишком велик, но · 00182, коэффициент, полученный путем предположения, что вязкость пропорциональна квадратному корню из температуры, был бы слишком мал.

Следовательно, по-прежнему остается верным, что законы вязкости газов не могут быть объяснены гипотезой столкновения твердых сфер; но некоторые выводы, сделанные Максвеллом в его следующей статье из его предполагаемого закона пропорциональности первой степени абсолютной температуры, требуют модификации.

Из только что описанных им экспериментов было ясно, что простая гипотеза о столкновении упругих тел не объясняет всех наблюдаемых явлений. Соответственно, в 1866 году Максвелл рассмотрел проблему в более общей форме в своей статье “Динамическая теория газов”, Фил. Пер., 1866.

В ней он рассматривал молекулы газа не как упругие сферы определенного радиуса, а как небольшие тела или группы молекул меньшего размера, отталкивающиеся друг от друга с силой, направление которой всегда проходит очень близко через центр тяжести молекул и величина которой очень близко представлена некоторой функцией расстояния между центрами тяжести. “Я внес, - продолжает он, - эту модификацию теории в результате результатов моих экспериментов с вязкостью воздуха при различных температурах, и я вывел из этих экспериментов, что отталкивание обратно пропорционально пятой степени расстояния”.

Поскольку более недавние наблюдения показали, что численные результаты работы Максвелла, связывающие вязкость и температуру, ошибочны, этот последний вывод не

выполняется; обратный закон силы пятой степени не даст правильного соотношения между вязкостью и температурой. Сам Максвелл позже, “О напряжениях в разреженных газах”, Фил. Trans., 1879, понял это; но даже в этой последней статье он придерживался пятого степенного закона, потому что это приводит к важному упрощению уравнений, с которыми предстоит иметь дело.

Статья 1866 года важна главным образом потому, что в ней впервые содержится применение общих динамических методов к молекулярным проблемам. Снова исследуется закон распределения скоростей между молекулами, и получается результат, практически идентичный тому, который был найден для упругих сфер. Однако при получении этого заключения предполагается, что распределение скоростей равномерно во всех направлениях относительно любой точки, какие бы действия ни происходили в газе. Если, например, температура различна в разных точках, то при данной скорости все направления не являются равновероятными. Следовательно, выражение Максвелла для числа молекул, которые в любой момент времени имеют заданную скорость, применимо только к постоянному состоянию, в котором распределение температуры равномерное. Когда имеешь дело, например, с теплопроводностью, необходима модификация выражения. На это указал Больцман.⁵²

В статье 1866 года Максвелл применяет свои обобщенные результаты к конечному распределению двух газов под действием силы тяжести, равновесию температуры между двумя газами и распределению температуры в вертикальном столбе. Эти результаты, как он утверждает, не зависят от закона взаимодействия молекул. Рассматриваются динамические причины диффузионной вязкости и теплопроводности, и они связаны с законом силы.

Из исследования также следует, что, исходя из гипотез, принятых за его основу, при смешивании двух видов газов разница между средними кинетическими энергиями перемещения газов каждого вида быстро уменьшается вследствие взаимодействия между ними. Таким образом, средняя кинетическая энергия перемещения имеет тенденцию становиться одинаковой для каждого вида газа, и, как и прежде, именно эта средняя энергия перемещения измеряет температуру.

Теоретически молекула - это часть газа, которая движется как единое тело. Это может быть просто точка, центр силы, обладающий инерцией, способный совершать работу при потере скорости. Также в каждой молекуле могут быть системы из нескольких таких центров силы, связанных вместе их взаимными действиями. Опять же, молекула может быть небольшим твердым телом определенной формы; но в этом случае мы должны, как указывает Максвелл, ввести новый набор сил, связывающих вместе части каждой молекулы: у нас должна быть молекулярная теория второго порядка. В любом случае, наиболее общее предположение состоит в том, что молекула состоит из ряда частей, которые держатся вместе, но способны к относительно движению друг относительно друга.

В этом случае кинетическая энергия молекулы складывается из энергии ее центра тяжести вместе с энергией ее составных частей относительно ее центра тяжести.⁵³

Итак, Клаузиус, как мы видели, привел основания полагать, что отношение полной энергии молекулы к энергии перемещения ее центра тяжести имеет тенденцию становиться постоянным. Мы уже использовали β для обозначения этой константы. Таким образом, хотя

температура измеряется средней кинетической энергией перемещения центра тяжести каждой молекулы, тепло, содержащееся в молекуле, составляет всю ее энергию и в β раз превышает это количество. Таким образом, выводы относительно удельной теплоемкости и т.д., Уже приведенные на стр. 130, применимы и в этом случае, и, в частности, мы имеем результат, что если γ — отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме, то -

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{1}{(\gamma-1)}$$

Теорема Максвелла о распределении кинетической энергии между системой молекул применялась, как он сформулировал ее в 1866 году, к кинетической энергии перемещения центра тяжести каждой молекулы. Два года спустя доктор Больцман в статье, на которую мы уже ссылались, распространил это понятие (с определенными ограничениями) на части, из которых состоит молекула. Согласно Максвеллу, средняя кинетическая энергия центра тяжести каждой молекулы стремится стать одинаковой. Согласно Больцману, средняя кинетическая энергия каждой части молекулы стремится стать одинаковой.

Максвелл, в последней статье, которую он написал на эту тему (“О теореме Больцмана о среднем распределении энергии в системе материальных точек”, Camb. Фил. Пер., XII.), занялся этой проблемой. Уотсон привел доказательство этого в 1876 году, отличное от доказательства Больцмана, но все же ограниченное условием, что время, в течение которого частица сталкивается с другими частицами, очень мало по сравнению со временем, в течение которого между ней и другими частицами не происходит ощутимого взаимодействия, а также что временем, в течение которого частица одновременно находится на расстоянии более чем одной другой частицы, можно пренебречь.

Максвелл утверждает, что его доказательство свободно от каких-либо подобных ограничений. Материальные точки могут воздействовать друг на друга на любых расстояниях и в соответствии с любым законом, который согласуется с сохранением энергии; на них также могут воздействовать силы, внешние по отношению к системе, при условии, что они согласуются с этим законом.

Единственное предположение, которое необходимо для прямого доказательства, состоит в том, что система, предоставленная самой себе в ее фактическом состоянии движения, рано или поздно пройдет через все фазы, которые согласуются с сохранением энергии.

В этой работе Максвелл находит в очень общем виде выражение для числа молекул, которые в любой момент времени имеют заданную скорость, и это, будучи упрощенным предположениями предыдущих работ, сводится к уже найденной форме. Он также показывает, что средняя кинетическая энергия, соответствующая любой из переменных, определяющих его систему, одинакова для каждой из переменных его системы.

Таким образом, согласно этой теореме, если каждая молекула представляет собой отдельное небольшое твердое тело, для определения положения каждой из них потребуется шесть переменных, три переменные дадут нам положение центра тяжести молекулы, в то время как три других будут определять положение тела относительно его центра тяжести. Если шесть переменных выбраны правильно, кинетическую энергию можно выразить как сумму шести квадратов, по одному квадрату, соответствующему каждой переменной. Согласно теореме, часть кинетической энергии, зависящая от каждого квадрата, одинакова. Таким образом, вся

энергия в шесть раз больше той, которая возникает от любой из переменных. Кинетическая энергия перемещения в три раза больше, чем энергия, возникающая от каждой переменной, поскольку она включает в себя три переменные, которые определяют положение центра тяжести. Следовательно, если мы обозначим через K кинетическую энергию, обусловленную одной переменной, то вся энергия будет равна $6K$, а поступательная энергия равна $3K$; таким образом, для данного случая —

$$\beta = 6K/3K = 2$$

Или, опять же, если мы предположим, что молекула такова, что для определения ее положения относительно центра тяжести требуется m переменных, поскольку для фиксации центра тяжести требуется 3, общее количество переменных, определяющих положение молекулы, равно $m + 3$, и говорят, что она имеет $m + 3$ степени свободы. Следовательно, в этом случае его полная энергия равна $(m + 3)K$, а энергия переноса равна $3K$, таким образом, мы находим—

$$\beta = (m + 3)/3$$

$$\text{Следовательно, } \gamma = 1 + 2/(m + 3) = 1 + 2/n$$

если n - число степеней свободы молекулы.

Таким образом, если эта теорема Больцмана-Максвелла верна, то удельная теплоемкость газа будет зависеть исключительно от числа степеней свободы каждой из его молекул. Для твердых тел мы должны иметь n , равное 6, и, следовательно, $\gamma = 1.333$. Теперь тот факт, что это не значение γ ни для одного из известных газов, является фундаментальной трудностью на пути принятия полной теории.

Больцман обратил внимание на тот факт, что если n равно пяти, то γ имеет значение 1.40. И это вполне согласуется со значением, найденным экспериментально для воздуха, кислорода, азота и различных других газов. Однако мы вскоре вернемся к этому вопросу.

Пожалуй, за последние годы в области физической науки не было результата, который обсуждался бы больше, чем две фундаментальные теоремы молекулярной теории, которыми мы обязаны Максвеллу и Больцману.

Два рассматриваемых результата - это (1) выражение для числа молекул, которые в любой момент будут иметь заданную скорость, и (2) утверждение о том, что кинетическая энергия в конечном счете распределяется поровну между всеми переменными, определяющими систему.

Что касается (1), то Максвелл показал, что его закон ошибок был одним из возможных условий постоянства. Если в какой-то момент скорости распределяются в соответствии с законом погрешности, то это распределение будет постоянным. Он не доказал, что такое распределение является единственным, которое может удовлетворять всем условиям задачи.

Доказательство того, что этот закон является необходимым, а также достаточным условием постоянства, было впервые дано Больцманом для отдельного одноатомного газа в 1872 году, для смеси таких газов в 1886 году и для многоатомного газа в 1887 году. С тех пор Уотсоном и Бербери были приведены другие доказательства. Рассмотрение вопроса о полноте или достаточности доказательств выходило бы за рамки этой книги. Обсуждение этого вопроса все еще продолжается.

Отчет Британской ассоциации за 1894 год содержит важный вклад в решение этого вопроса в форме доклада г-на Г. Х. Брайана, и дискуссия, которую он начал в Оксфорде, прочитав этот отчет, была продолжена на страницах *Nature* и в других местах с тех пор.

Мистер Брайан в первую очередь показывает, какова может быть природа систем молекул, к которым будут применимы результаты, и обсуждает различные моменты сложности доказательства.

Рассматриваемая теорема, из которой результат (1) следует как простой вывод, была сформулирована таким образом доктором Лармором.⁵⁴

“Существует положительная функция, принадлежащая группе молекул, которая, когда они переходят в устойчивое состояние — в среднем производное от большого числа конфигураций — поддерживает устойчивую тенденцию к снижению. Устойчивое состояние Максвелла-Больцмана - это такое состояние, при котором эта функция, наконец, достигает своего минимального значения и, таким образом, является уникальным устойчивым состоянием, при этом все же следует иметь в виду, что это всего лишь предположение о средних значениях, полученных из большого числа случаев, когда при столкновениях ничего не сохраняется, кроме энергии, и что могут существовать исключительные обстоятельства, сравнительно очень немногочисленные, при которых тенденция, во всяком случае, временно меняется в другую сторону”.

Эта теорема, применяемая к случаям движения, таким как движение газа при постоянной температуре, заключенного в жесткую оболочку, непроницаемую для тепла, по-видимому, доказана. Следовательно, для такого случая закон Максвелла-Больцмана является единственно возможным.

Но так это или нет, закон, впервые введенный Максвеллом, является одним из возможных, и прогресс в молекулярной науке благодаря его введению огромен.

Теперь мы переходим ко второму результату - равному распределению энергии между всеми степенями свободы каждой молекулы. Лорд Кельвин указал на недостаток в доказательстве Максвелла, но Больцман показал (*Philosophical Magazine*, март 1893 г.), как этот недостаток может быть легко исправлен, и можно сказать, что во всех случаях, когда справедлив закон распределения скоростей Больцмана-Максвелла, справедлив и закон равного распределения энергии Максвелла.

М-р Брайан рассматривает три случая, в которых закон распределения не работает для жестких молекул: первый - когда все молекулы, в дополнение к их скоростям перемешивания, имеют общую скорость перемещения в фиксированном направлении; второй - когда газ движется с равномерным вращением вокруг фиксированной оси; в то время как третий - когда каждая молекула имеет ось симметрии. В этом последнем случае силы, действующие во время столкновения, обязательно проходят через ось симметрии, следовательно, угловая скорость любой молекулы вокруг этой оси остается постоянной, количество молекул, имеющих заданную угловую скорость, будет оставаться неизменным на протяжении всего движения, а часть

кинетической энергии, которая зависит от этой составляющей движения, останется неизменной и не будет приниматься во внимание при равном распределении энергии между различными степенями свободы.

Такая молекула имеет пять, а не шесть степеней свободы; три величины необходимы для определения положения ее центра тяжести и две для фиксации положения оси симметрии.

В этом случае, тогда, как указывает Больцман, в выражении для отношения удельных теплоемкостей мы должны иметь n равным 5, и, следовательно,

$$\gamma = 1 + 2/n = 1 + 2/5 = 1.4$$

справедливо согласуется со значением, найденным для воздуха и различных других постоянных газов.

Таким образом, для случаев, когда мы рассматриваем каждый атом как отдельное твердое тело, теорема Больцмана-Максвелла, по-видимому, дает уникальное решение, а закон распределения энергии Максвелла находится в точном соответствии с результатами наблюдений.⁵⁵

Если мы никогда не сможем продвинуться дальше — а следует признать, что трудности на пути дальнейшего продвижения огромны, — то, я думаю, можно утверждать, что Максвелл во многом обязан уже достигнутому прогрессу. Оба этих закона для случая упругих сфер содержатся в его первой статье 1860 года; и хотя именно гению Больцмана мы обязаны их самым ранним обобщением и, в частности, доказательством единственности решения при соответствующих ограничениях, последняя статья Максвелла в немалой степени способствовала упрочению позиции. Его работой являются не только основы, но и большая часть надстройки молекулярной науки.

Трудности на пути продвижения вперед, как мы уже говорили, огромны. Больцман в одной из своих работ рассмотрел свойства сложной молекулы газа, состоящей, возможно, из ряда атомов и, возможно, связанных с ними атомов эфира, и он приходит к выводу, что такая молекула будет вести себя в своем поступательном движении и при столкновениях с другими молекулами почти как твердое тело. Но процитируем мистера Брайана: “Случай многоатомной молекулы, атомы которой способны вибрировать относительно друг друга, предоставляет интересное поле для исследований и спекуляций. Является ли распределение Больцмана по-прежнему уникальным, или существуют другие постоянные распределения, в которых кинетическая энергия разделена неравномерно?”

Опять же, спектроскоп выявляет нам колебания эфира, которые каким-то образом связаны с колебаниями молекул газа, спектр которых мы наблюдаем. Кажется очевидным, что закон равного распределения неприменим к ним, и все же, если мы должны предположить, что колебания эфира обусловлены реальными колебаниями атомов, составляющих молекулу, почему он не применим? Откуда берется условие, которое приводит к неудаче в доказательстве? Или, опять же, дело, как уже было высказано, в том факте, что сложный спектр газа представляет собой члены ряда Фурье, в который эфир преобразует некоторые сложные колебания атомов? или этот спектр обусловлен просто электромагнитными колебаниями на

поверхности молекул — колебаниями, период которых определяется главным образом размером и формой молекулы, но в которых принимают участие атомы, из которых она состоит? На пути любого из этих объяснений стоят серьезные трудности, но мы не должны позволять нашему страху перед задачей, которую еще предстоит выполнить, закрывать нам глаза на величие работы Максвелла.

Остается упомянуть еще один важный документ и ряд более коротких статей.

Закон Больцмана-Максвелла применим только к случаям, когда температура повсюду одинакова. В статье, опубликованной в “Философских трудах” за 1879 год, посвященной “Напряжениям в разреженных газах, возникающим из-за неравенств температур”, Максвелл, среди прочего, рассматривает теорию радиометра. Он показывает, что наблюдаемые движения не будут иметь места, если газ, находящийся в контакте с твердым телом, не сможет скользить вдоль поверхности твердого тела с конечной скоростью между местами, где температура отличается; и в приложении он доказывает, что при определенных допущениях относительно характера контакта твердого тела и газа, даже при постоянном давлении поток газа вдоль поверхности от более холодных частей к более горячим.

Среди его менее важных работ, имеющих отношение к молекулярной теории, следует упомянуть лекцию о “Молекулах” Британской ассоциации на ее собрании в Брэдфорде; “Научные труды клерка Максвелла”, том ii, стр. 361; и еще одну о “Молекулярном строении тел”, Научные труды, том ii, стр. 418.

В этом последнем, а также в обзоре в *Nature* книги Ван-дер-Ваальса “Непрерывность газообразного и жидкого состояний”, [56](#) он объясняет и обсуждает вириальное уравнение Клаузиуса, с помощью которого объясняются отклонения постоянных газов от закона Бойля. В лекции в неподражаемом стиле Максвелла дается ясный отчет о достижениях кинетической теории к моменту ее прочтения и четко обозначаются трудности, с которыми ей приходится сталкиваться. Максвелл считал, что наиболее серьезными являются те, которые вытекают из известных значений соотношения удельных теплотерм.

В статьях “Атомное строение тел” и “Диффузия” девятого издания *Британской энциклопедии* представлены более поздние взгляды Максвелла на фундаментальные предпосылки молекулярной теории.

Учебник по “Теплу” содержит некоторые дальнейшие разработки этой теории. В частности, он показывает, как выводы второго закона термодинамики связаны с тем фактом, что грубость наших способностей не позволяет нам разбираться с отдельными молекулами.

Работы, описанной в предыдущих главах, было бы достаточно, чтобы обеспечить Максвеллу выдающееся место среди тех, кто продвинул вперед наши знания; остается еще описать его величайшую работу, его теорию электричества и магнетизма.

ГЛАВА IX.

НАУЧНАЯ РАБОТА.—ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ.

Первая статья клерка Максвелла по электрике — о “Силовых линиях” Фарадея — была прочитана в Кембриджском философском обществе 10 декабря 1855 года, а Часть II - 11 февраля 1856 года. В то время автор был бакалавром гуманитарных наук, ему было всего двадцать три года, и с момента получения степени прошло менее года.

Вступительные слова статьи следующие (Научные труды, том i, стр. 155):—

“Нынешнее состояние науки об электротехнике кажется особенно неблагоприятным для спекуляций. Законы распределения электричества по поверхности проводников были аналитически выведены из эксперимента; некоторые части математической теории магнетизма установлены, в то время как в других частях отсутствуют экспериментальные данные; теория проведения гальванизма и теория взаимного притяжения проводников были сведены к математическим формулам, но не вступили в связь с другими разделами науки. Никакая электрическая теория в настоящее время не может быть выдвинута, если она не покажет связь не только между электричеством в состоянии покоя и электричеством в токе, но и между притяжением и индуктивными эффектами электричества в обоих состояниях. Такая теория должна точно удовлетворять тем законам, математическая форма которых известна, и должна предоставлять средства расчета эффектов в предельных случаях, когда известные формулы неприменимы. Следовательно, для того, чтобы оценить требования науки, учащийся должен ознакомиться со значительным объемом наиболее сложной математики, простое удержание которой в памяти существенно препятствует дальнейшему прогрессу. Следовательно, первым процессом эффективного изучения науки должно быть упрощение и сведение результатов предыдущих исследований к форме, в которой разум может их воспринять. Результаты такого упрощения могут принять форму чисто математической формулы или физической гипотезы. В первом случае мы полностью упускаем из виду явления, подлежащие объяснению; и хотя мы можем проследить следствия данных законов, мы никогда не сможем получить более расширенного представления о связях предмета. С другой стороны, если мы принимаем физическую гипотезу, мы видим явления только через посредство медиума и подвержены той слепоте к фактам и опрометчивости в предположениях, которые поощряются частичным объяснением. Следовательно, мы должны найти какой-нибудь метод исследования, который позволял бы разуму на каждом шагу цепляться за ясную физическую концепцию, не привязываясь к какой-либо теории, основанной на физической науке, из которой заимствована эта концепция, чтобы он не отвлекался от предмета в погоне за аналитическими тонкостями и не выходил за рамки истины из-за любимой гипотезы.

“Чтобы получить физические идеи без принятия физической теории, мы должны ознакомиться с существованием физических аналогий. Под физической аналогией я подразумеваю то частичное сходство между законами одной науки и законами другой, которое заставляет каждый из них иллюстрировать другой. Таким образом, все математические науки основаны на соотношениях между физическими законами и законами чисел, так что целью точной науки является сведение проблем Природы к определению величин посредством операций с элементами. Переходя от наиболее универсальной из всех аналогий к очень частичной, мы обнаруживаем одно и то же сходство в математической форме между двумя различными явлениями, дающее начало физической теории света.

“Изменения направления, которым подвергается свет при переходе из одной среды в другую, идентичны отклонениям траектории частицы при движении через узкое пространство, в котором действуют интенсивные силы. Эта аналогия, которая распространяется только на направление, а не на скорость движения, долгое время считалась истинным объяснением преломления света; и мы все еще находим ее полезной при решении определенных проблем, в которых мы без опасности применяем ее как искусственный метод. Другая аналогия, между светом и колебаниями упругой среды, простирается гораздо дальше, но, хотя ее важность и плодотворность трудно переоценить, мы должны помнить, что она основана только на *сходстве по форме* между законами света и законами колебаний. Сняв с нее физическую оболочку и сведя ее к теории “поперечных чередований”, мы могли бы получить систему истины, строго основанную на наблюдении, но, вероятно, недостаточную как по яркости ее концепций, так и по плодovitости ее метода. Я много говорил о спорных вопросах оптики в качестве подготовки к обсуждению почти общепринятой теории притяжения на расстоянии.

“Мы все усвоили математическую концепцию этих притяжений. Мы можем рассуждать о них и определять их соответствующие формы или формулы. Эти формулы имеют отчетливое математическое значение, и установлено, что их результаты соответствуют природным явлениям. В прикладной математике нет формулы, более соответствующей Природе, чем формула притяжения, и нет теории, лучше утвердившейся в умах людей, чем теория воздействия тел друг на друга на расстоянии. Законы теплопроводности в однородных средах на первый взгляд кажутся одними из самых отличных по своим физическим соотношениям от законов, относящихся к аттракциям. Величины, которые входят в них, - *это температура, поток тепла, проводимость*. Слово *сила* чуждо данному предмету. Однако мы обнаруживаем, что математические законы равномерного движения тепла в однородных средах идентичны по форме законам притяжения, изменяющимся обратно пропорционально квадрату расстояния. Нам стоит только заменить *источник тепла* на *центр притяжения*, *поток тепла* на *ускоряющий эффект притяжения* в любой точке, а *температуру* на *потенциал*, и решение проблемы притяжения превращается в решение проблемы тепла.

“Эта аналогия между формулами тепла и притяжения была, я полагаю, впервые отмечена профессором Уильямом Томсоном в Cambridge Mathematical Journal, Vol. III.

“Теперь предполагается, что теплопроводность осуществляется за счет взаимодействия между смежными частями среды, в то время как сила притяжения является отношением между удаленными телами, и все же, если бы мы знали не больше, чем выражено в математических формулах, не было бы ничего, что отличало бы один набор явлений от другого.

“Это правда, что, если мы введем другие соображения и понаблюдаем дополнительные факты, эти два предмета примут совершенно разные аспекты, но математическое сходство некоторых из их законов сохранится и все еще может быть использовано для возбуждения соответствующих математических идей.

“Именно с помощью аналогий такого рода я попытался представить уму в удобной и управляемой форме те математические идеи, которые необходимы для изучения явлений электричества. Методы, как правило, те, которые предлагаются процессами рассуждения, которые встречаются в исследованиях Фарадея, и которые, хотя они были математически интерпретированы профессором Томсоном и другими, в целом считаются неопределенными и нематематическими по характеру, по сравнению с теми, которые используются известными

математиками. С помощью метода, который я использую, я надеюсь сделать очевидным, что я не пытаюсь установить какую-либо физическую теорию науки, в которой я едва ли провел ни одного эксперимента, и что предел моих замыслов состоит в том, чтобы показать, как, путем строгого применения идей и методов Фарадея, связь самых разных порядков явлений, которые он открыл, может быть четко поставлена перед математическим умом. Поэтому я буду, насколько смогу, избегать введения чего-либо, что не служит прямой иллюстрацией методов Фарадея или математических выводов, которые могут быть сделаны из них. При рассмотрении более простых частей предмета я буду использовать математические методы Фарадея, а также его идеи. Когда сложность предмета потребует этого, я буду использовать аналитические обозначения, по-прежнему ограничиваясь развитием идей, выдвинутых тем же философом.

“В первую очередь я должен объяснить и проиллюстрировать идею “силовых линий”.

“Когда тело каким-либо образом наэлектризовано, маленькое тело, заряженное положительным электричеством и помещенное в любое заданное положение, будет испытывать силу, толкающую его в определенном направлении. Если маленькое тело теперь наэлектризовано отрицательно, оно будет подталкиваться равной силой в прямо противоположном направлении.

“Такие же отношения существуют между магнитным телом и северным или южным полюсами небольшого магнита. Если северный полюс направлен в одном направлении, то южный - в противоположном.

Таким образом, мы могли бы найти линию, проходящую через любую точку пространства, такую, что она представляет направление силы, действующей на положительно наэлектризованную частицу или элементарный северный полюс, и обратное направление силы на отрицательно наэлектризованную частицу или элементарный южный полюс. Поскольку в каждой точке пространства можно найти такое направление, если мы начнем с любой точки и проведем линию так, чтобы по мере продвижения по ней ее направление в любой точке всегда совпадало с направлением результирующей силы в этой точке, эта кривая будет указывать направление этой силы для каждой точки, через которую она проходит, и может быть названа по этой причине *силовой линией*. Мы могли бы таким же образом нарисовать другие силовые линии, пока не заполнили бы все пространство кривыми, указывающими своим направлением направление силы в любой заданной точке.

Таким образом, мы должны были бы получить геометрическую модель физических явлений, которая сообщала бы нам *направление* силы, но нам все равно потребовался бы какой-то метод указания *интенсивности* силы в любой точке. Если мы рассматриваем эти кривые не просто как линии, а как тонкие трубки переменного сечения, по которым течет несжимаемая жидкость, то, поскольку скорость жидкости обратно пропорциональна сечению трубки, мы можем изменять скорость в соответствии с любым заданным законом, регулируя сечение трубки, и таким образом мы могли бы представлять интенсивность силы, а также ее направление движением жидкости в этих трубках. Этот метод представления интенсивности силы посредством скорости воображаемой жидкости в трубке применим к любой мыслимой системе сил, но он способен к значительному упрощению в случае, когда силы таковы, что могут быть объяснены гипотезой притяжения, изменяющегося обратно пропорционально квадрату расстояния, например, наблюдаемого в электрических и магнитных явлениях. В случае совершенно произвольной системы сил между трубками обычно будут промежутки; но в случае

электрических и магнитных сил можно расположить трубки так, чтобы не оставлять промежутков. Тогда трубки будут просто поверхностями, направляющими движение жидкости, заполняющей все пространство. Обычно исследование законов действия этих сил начиналось с предположения, что явления обусловлены силами притяжения или отталкивания, действующими между определенными точками. Мы можем, однако, получить другой взгляд на предмет, более подходящий для наших более сложных исследований, приняв для определения сил, о которых мы говорим, что они могут быть представлены по величине и направлению равномерным движением несжимаемой жидкости.

Итак, я предлагаю, во-первых, описать метод, с помощью которого можно четко представить движение такой жидкости; во-вторых, проследить последствия допущения определенных условий движения и указать на применение метода к некоторым из менее сложных явлений электричества, магнетизма и гальванизма; и, наконец, показать, как путем расширения этих методов и введения другой идеи, принадлежащей Фарадею, можно четко представить законы притяжения и индуктивного действия магнитов и токов, не делая никаких предположений относительно физической природы электричества или добавляя что-либо к тому, что уже было сделано. Это уже было доказано экспериментально.

“Сводя все к чисто геометрической идее движения воображаемой жидкости, я надеюсь достичь общности и точности и избежать опасностей, возникающих из-за преждевременной теории, претендующей на объяснение причины явлений. Если окажется, что результаты простого умозрения, которые я собрал, могут быть как-то полезны философам-экспериментаторам при систематизации и интерпретации их результатов, они достигнут своей цели, и зрелая теория, в которой физические факты будут объяснены физически, будет сформирована теми, кто, исследуя саму Природу, может получить единственно верное решение вопросов, которые предлагает математическая теория”.

Идея была смелой: двадцатитрехлетнему юноше объяснить с помощью движений несжимаемой жидкости некоторые из менее сложных явлений электричества и магнетизма, показать, как можно ясно представить законы притяжения магнитов и токов, не делая никаких предположений относительно физической природы электричества и ничего не добавляя к тому, что уже было доказано экспериментально.

Возможно, будет полезно в нескольких словах рассмотреть положение электрической теории ⁵⁷ в 1855 году.

Эксперименты Кулона установили фундаментальные факты электростатического притяжения и отталкивания, а сам Кулон примерно в 1785 году сформулировал теорию, основанную на этих экспериментах, которую можно было “опровергнуть, только доказав, что его экспериментальные результаты неточны”.⁵⁸

Кулон предполагает существование двух электрических жидкостей, теория, разработанная ранее Франклином, но говорит —

“Je préviens pour mettre la théorie qui va suivre à l’abri de toute dispute systématique, que dans la supposition de deux fluides électriques, je n’ai autre intention que de présenter avec le moins

d'éléments possible les résultats du calcul et de l'expérience, et non d'indiquer les véritables causes de l'électricité."

Кавендиш работал в Англии примерно в то же время, что и Кулон, но опубликовал очень мало, и ценность и важность его работы не были признаны до появления в 1879 году "Электрических исследований Генри Кавендиша" под редакцией клерка Максвелла.

В начале нынешнего столетия применение математического анализа к электрическим задачам было начато Лапласом, который исследовал распределение электричества по сфероидам, и примерно в 1811 году была опубликована великая работа Пуассона о распределении электричества по двум сферам, расположенным на любом заданном расстоянии друг от друга. Тем временем исследовались свойства электрического тока. Открытие Гальвани мышечного сокращения в лапке лягушки, вызванного контактом разнородных металлов, было сделано в 1790 году. Вольта изобрел вольтову батарею в 1800 году, а Эрстед в 1820 году обнаружил, что электрический ток создает магнитную силу в непосредственной близости от нее. На этом Ампер заложил основу своей теории электродинамики, в которой он показал, как рассчитать силы между цепями, по которым протекают токи, исходя из предполагаемого закона силы между каждой парой элементов цепей. Его эксперименты доказали, что следствия, вытекающие из этого закона, согласуются со всеми наблюдаемыми фактами. Они не доказывают, что только закон Ампера может объяснить факты.

Максвелл, пишущий на эту тему в "Электричестве и магнетизме", том ii, стр. 162, говорит:

"Экспериментальное исследование, с помощью которого Ампер установил законы механического взаимодействия электрических токов, является одним из самых блестящих достижений науки.

"Вся теория и эксперимент в целом выглядят так, как будто они выросли во всеоружии из мозга 'Ньютона электричества'. Она совершенна по форме и неопровержима в точности и сведена в формулу, из которой можно вывести все явления и которая всегда должна оставаться основной формулой электродинамики.

Однако метод Ампера, хотя и облеченный в индуктивную форму, не позволяет нам проследить формирование идей, которыми он руководствовался. Мы едва ли можем поверить, что Ампер действительно открыл закон действия с помощью описываемых им экспериментов. Мы склоняемся к подозрению, о чем, собственно, он говорит нам сам, что он открыл закон с помощью какого-то процесса, который он нам не показывал, и что когда он впоследствии создал совершенную демонстрацию, он удалил все следы строительных лесов, с помощью которых он его построил".

Экспериментальные доказательства теории Ампера, по крайней мере, насколько это было возможно получить из экспериментов с замкнутыми цепями, были предоставлены У. Вебером безупречно примерно в 1846 году, в то время как в предыдущем году Грассман и Ф. Э. Нейман опубликовали законы притяжения между двумя элементами тока, которые отличаются от законов Ампера, но приводят к тому же результату для замкнутых цепей. В статье, опубликованной в 1846 году, Вебер объявил о своей гипотезе, связывающей воедино электростатическое и электродинамическое действие. В этой работе он предположил, что сила между двумя электрическими частицами зависит от движения частиц, а также от их расстояния друг от друга. Несколько похожая теория была предложена Гауссом и опубликована после его

смерти в его собрании сочинений. Однако было показано, что теория Гаусса несовместима с принципом сохранения энергии. Теория Вебера позволяет избежать этого несоответствия и приводит для замкнутых цепей к тем же результатам, что и Ампер. Однако фон Гельмгольцем было доказано, что, согласно ему, при определенных обстоятельствах тело вело бы себя так, как если бы его масса была отрицательной — оно двигалось бы в направлении, противоположном направлению действия силы.⁵⁹

С 1846 года было предложено множество других теорий для объяснения законов Ампера. Между тем, в 1821 году Фарадей заметил, что при определенных обстоятельствах провод, по которому течет ток, может непрерывно вращаться в магнитном поле за счет действия магнитов и тока. В 1824 году Араго наблюдал движение магнита, вызванное вращением медного диска по соседству с ним, а в 1831 году Фарадей начал свои экспериментальные исследования электромагнитной индукции. Примерно в тот же период Джозеф Генри из Вашингтона независимо от Фарадея проводил фундаментально важные эксперименты по электромагнитной индукции, но его работе не уделялось достаточного внимания до сравнительно недавних лет.

В 1833 году Ленц провел несколько важных исследований, которые привели его к открытию связи между направлением индуцированных токов и законами Ампера, обобщенными в его правиле о том, что направление индуцированного тока всегда таково, что его электромагнитное действие противодействует движению, которое его индуцирует.

В 1845 году Ф. Э. Нейман разработал на основе этого закона математическую теорию электромагнитной индукции, и примерно в то же время В. Вебер показал, как это можно вывести из его элементарного закона электрического действия.

Великое имя фон Гельмгольца впервые упоминается в связи с этим предметом в 1851 году, но о его трудах мы подробнее расскажем позже.

Между тем, в тот же период различные авторы, Мерфи, Плана, Чарльз, Штурм и Гаусс, расширили работу Пуассона по электростатике, рассматривая возникшие вопросы как проблемы распределения притягивающей жидкости, притягивающей или отталкивающей в соответствии с законом Ньютона, хотя и здесь наибольших успехов добился сапожник-самоучка из Ноттингема по имени Джордж Грин в своей статье “О применении математического анализа к теориям электричества и магнетизма”, 1828.

Исследования Грина, пишет лорд Кельвин, “привели к элементарному утверждению, которое должно составлять законную основу каждой совершенной математической структуры, которая должна быть создана из материалов, предоставленных экспериментальными законами Кулона”.

Следует отметить, что Грин был изобретателем термина "Потенциал". Однако его эссе оставалось без внимания с 1828 года, пока лорд Кельвин не привлек к нему внимание в 1845 году. Между тем некоторые из его наиболее важных результатов были заново открыты Гауссом, Чарльзом и самим Томсоном.

Примерно до 1845 года экспериментальной работой, на которой были основаны эти математические исследования в электростатике, была работа Кулона. Предполагается, что

наэлектризованное тело заряжено каким-то невесомым текучим “электричеством”. Частицы электричества отталкиваются друг от друга по определенному закону, и жидкость в равновесии распределяется по поверхности любого заряженного проводника в соответствии с этим законом. Согласно этой теории, существуют два противоположных вида электрического тока, положительный и отрицательный, два заряда одного и того же вида отталкиваются, два заряда противоположных видов притягиваются; отталкивание или притяжение пропорционально произведению зарядов и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними.

Действие между двумя зарядами - это действие на расстоянии, происходящее в пространстве, разделяющем их.

Фарадей в 1837 году, в одиннадцатой серии своих “Экспериментальных исследований”, опубликовал свою первую статью об “Электростатической индукции”. Он показал — как, впрочем, и Кавендиш доказал задолго до этого, хотя результат остался неопубликованным, — что сила между двумя заряженными телами будет зависеть от окружающей их изолирующей среды, а не только от их формы и положения. Индукция, как он это выражает, происходит по изогнутым линиям и представляет собой действие смежных частиц; эти изогнутые линии он называет “силовыми линиями”.

Обсуждая эти исследования в 1845 году, лорд Кельвин пишет⁶⁰:—

“ Исследования мистера Фарадея ... были предприняты с целью проверки идеи, которой он давно придерживался, о том, что силы притяжения и отталкивания, проявляемые свободным электричеством, не являются результатом действий, осуществляемых на расстоянии, а распространяются посредством молекулярного взаимодействия между смежными частицами изолирующей среды, окружающей наэлектризованные тела, которую он поэтому называет диэлектриком. Эта идея привела его к некоторым очень замечательным взглядам на индукцию или, фактически, на электрическое действие в целом. Поскольку невозможно, чтобы явления, наблюдаемые Фарадеем, были несовместимы с результатами эксперимента, составляющими теорию Кулона, следует ожидать, что отличие его идей от идей Кулона должно проистекать исключительно из другого метода формулирования и физической интерпретации тех же законов; и далее, я думаю, можно показать, что любой метод рассмотрения этого предмета, если зайти достаточно далеко, может быть положен в основу математической теории, которая привела бы к элементарным принципам другого в качестве следствий. Эта теория, соответственно, была бы выражением окончательного закона явлений, независимо от любой физической гипотезы, которую мы могли бы принять при других обстоятельствах. То, что неизбежно существуют два различных элементарных подхода к теории электричества, можно увидеть из следующих соображений”

На следующих страницах лорд Кельвин развивает следствия аналогии между теплопроводностью и электростатическим действием, на которую он указал тремя годами ранее (1842) в своей статье “Равномерное движение тепла в однородных твердых телах”, и обсуждает ее связь с математической теорией электричества.

Показано, что задача распределения источников тепла в данном однородном теплопроводе с целью создания определенной устойчивой температуры в каждой точке проводника *математически* идентична задаче распределения электричества в равновесном

состоянии с целью создания в каждой точке электрического потенциала, имеющего то же значение, что и температура.

Таким образом, фундаментальные законы теплопроводности могут быть положены в основу математической теории электричества, но физическая идея, которую они предлагают, заключается в распространении некоторого эффекта посредством взаимного действия смежных частиц, а не притягивания или отталкивания материальных частиц на расстоянии, что естественным образом следует из утверждения закона Кулона.

Лорд Кельвин продолжает:—

“Все взгляды, которые Фарадей выдвинул и проиллюстрировал, как показано экспериментом, приводят к этому методу построения математической теории, и, что касается анализа, он в большинстве *общих* положений был бы более простым, если это возможно, чем кулоновский. Конечно, анализ *конкретных* проблем был бы идентичен в этих двух методах. Именно таким образом Фарадей приходит к знанию некоторых наиболее важных математических теорем, которые по своей природе, казалось, обречены восприниматься только как математические истины”.

Статьи лорда Кельвина “Математическая теория электричества”, опубликованные с 1848 по 1850 год, его “Положения о теории притяжения” (1842), его “Теория электрических образов” (1847) и его статья “Математическая теория магнетизма” (1849) содержат изложение наиболее важных результатов, достигнутых в математических науках Электростатики и магнетизма ко времени публикации первой статьи Максвелла.

Вступительные предложения этой статьи уже цитировались. В предисловии к “Электричеству и магнетизму” Максвелл пишет так:—

“Прежде чем я начал изучать электричество, я решил не читать математику по этому предмету, пока не прочитаю ‘Экспериментальные исследования электричества’. Я знал, что предполагалась разница между способом понимания явлений Фарадеем и способом математиков, так что ни он, ни они не были удовлетворены языком друг друга. У меня также было убеждение, что это расхождение возникло не из-за того, что ни одна из сторон не была права. Впервые я убедился в этом благодаря сэру Уильяму Томсону, чьим советам и помощи, а также его опубликованным работам я обязан большей частью того, что я узнал по этому вопросу.

Продолжая изучать Фарадея, я понял, что его метод понимания явлений также был математическим, хотя и не представлен в общепринятой форме математических символов. Я также обнаружил, что эти методы можно выразить в обычных математических формах и, таким образом, сравнить с методами профессиональных математиков.

Например, Фарадей мысленным взором видел силовые линии, пересекающие все пространство, тогда как математики видели центры силы, притягивающиеся на расстоянии. Фарадей видел медиума там, где они не видели ничего, кроме расстояния. Фарадей искал причину явлений в реальных действиях, происходящих в медиуме. Они были удовлетворены тем, что обнаружили это в силе действия на расстоянии, запечатленной в электрических жидкостях”.

Итак, Максвелл увидел аналогию между электростатикой и установившимся движением несжимаемой жидкости, такой как вода, и именно эту аналогию он развивает в первой части своей статьи. Вода течет по определенным линиям; поверхность, полностью состоящая из таких линий течения, будет обладать тем свойством, что вода никогда ее не пересекает. В любом потоке воды мы можем представить себе ряд нарисованных таких поверхностей, разделяющих его на ряд трубок; каждая из них будет трубкой потока, каждая из этих трубок всегда остается заполненной водой. Следовательно, количество воды, которое пересекает в секунду любое сечение проточной трубы, перпендикулярное ее длине, всегда одно и то же. Таким образом, исходя из формы трубы, мы можем получить информацию о направлении и силе потока, поскольку там, где труба широкая, поток будет пропорционально меньшим, *и наоборот*.

Опять же, мы можем втянуть жидкость на несколько поверхностей, на каждой из которых давление одинаково; эти поверхности будут перерезать каналы подачи под прямым углом. Предположим, что они нарисованы так, что разница давлений между любыми двумя последовательными поверхностями равна единице, тогда поверхности будут находиться близко друг к другу в точках, в которых давление изменяется быстро; там, где изменение давления происходит медленно, расстояние между двумя последовательными поверхностями будет значительным.

Таким образом, если в любом случае движения мы сможем нарисовать поверхности давления и проточные трубы, мы сможем полностью определить движение жидкости. Теперь те же математические выражения, которые появляются в гидродинамической теории, встречаются также в теории электричества, меняется только значение символов. Для скорости жидкости мы должны написать электрическую силу. Вместо разницы в давлении жидкости мы подставляем выполненную работу, или разницу в электрическом потенциале или давлении.

Поверхности и трубки, нарисованные как решение любой гидродинамической задачи, дают нам также решение электрической задачи; трубки потока - это силовые трубки Фарадея, или индукционные трубки, поверхности постоянного давления - это поверхности с равным электрическим потенциалом. Индукция может происходить по изогнутым линиям точно так же, как трубки потока могут изгибаться; аналогия между ними является полной.

Но, как показывает Максвелл, аналогия простирается еще дальше. Было признано, что электрический ток, текущий по проводу, обладает многими свойствами, аналогичными свойствам тока жидкости в трубке. Когда постоянный ток проходит по любому твердому проводнику, в проводниках образуются трубки электрического тока и поверхности постоянного давления. Эти трубки и поверхности такие же, как те, которые образуются при прохождении жидкости через твердое тело, граничная поверхность которого такая же, как у проводника, при условии, что поток жидкости правильно пропорционален потоку электричества.

Эти аналогии относятся к постоянным токам, при которых, следовательно, течение в любой точке проводника не зависит от времени. В части II. в своей работе Максвелл рассматривает электротоническое состояние Фарадея. Фарадей обнаружил, что когда в магнитных явлениях, окружающих проводник, происходят *изменения*, в нем возникает электрический ток, который продолжается до тех пор, пока происходят магнитные изменения, но который прекращается, когда магнитное состояние становится устойчивым.

Соображения такого рода побудили профессора Фарадея связать со своим открытием индукции электрических токов концепцию состояния, в которое все тела приводятся присутствием магнитов и токов. Это состояние не проявляется никакими известными явлениями до тех пор, пока оно не нарушено, но любое изменение в этом состоянии обозначается токами или тенденцией к току. Этому состоянию он дал название ‘Электротоническое состояние’, и хотя впоследствии ему удалось объяснить явления, которые вызвали это состояние, с помощью менее гипотетических концепций, он несколько раз намекал на вероятность того, что могут быть обнаружены некоторые явления, которые сделали бы электротоническое состояние объектом законной индукции. Эти рассуждения, к которым Фарадея привело изучение законов, которые он хорошо установил, и от которых он отказался только из-за нехватки экспериментальных данных для прямого доказательства неизвестного состояния, не были, я думаю, сделаны предметом математического исследования. Возможно, можно подумать, что количественные определения различных явлений недостаточно строги, чтобы их можно было положить в основу математической теории. Фарадей, однако, не удовлетворился простым изложением численных результатов своих экспериментов и предоставил открывать закон с помощью вычислений. Там, где он постиг какой-либо закон, он сразу же формулирует его в терминах столь же недвусмысленных, как термины чистой математики, и если математик, принимая это как физическую истину, выводит из этого другие законы, которые можно проверить экспериментально, он просто помогает физике упорядочить его собственные идеи, что, по общему признанию, является необходимым шагом в научной индукции.

Следовательно, в ходе следующего исследования законы, установленные Фарадеем, будут приняты за истинные, и будет показано, что, следуя его рассуждениям, из них можно вывести другие, более общие законы. Если, таким образом, окажется, что эти законы, первоначально разработанные для охвата одного набора явлений, могут быть обобщены для распространения на явления другого класса, эти математические связи могут подсказать физикам способы установления физических связей, и, таким образом, простые предположения могут быть использованы для объяснения в экспериментальной науке”.

Максвелл показывает, как получить математическое выражение для электротонического состояния Фарадея. В его “Электричестве и магнетизме” это электротоническое состояние получает новое название. Он известен как Векторный потенциал,⁶¹ и рассматриваемая статья содержит, хотя и в неполной форме, его первое изложение тех уравнений электрического поля, которые так неразрывно связаны с именем Максвелла.

Большим достижением в теории, сделанным в статье, является четкое признание определенных математических функций как представляющих электротонное состояние Фарадея и их использование при решении электромагнитных задач.

Статья не содержит новой физической теории электричества, но через несколько лет она появилась. В своих более поздних работах Максвелл придерживался более общего взгляда на электромагнитное поле, чем тот, который содержался в его ранних работах о “Физических силовых линиях”. Следовательно, не следует предполагать, что несколько грубоватая концепция зубчатых колес и шкивов, которую мы собираемся описать, была для их автора чем-то большим, чем моделью, позволившей ему понять, как изменения, происходящие при прохождении электрического тока по проводу, могут быть представлены движением реальных материальных частиц.

Стоявшая перед ним задача состояла в том, чтобы разработать физическую теорию электричества, которая объясняла бы силы, действующие на наэлектризованные тела, посредством взаимодействия между смежными частями среды в пространстве, окружающем эти тела, а не путем прямого воздействия на разделяющее их расстояние. Аналогичный вопрос, до сих пор оставшийся без ответа, возник в случае с гравитацией. Астрономы определили силы между притягивающими телами; они не знают, как возникают эти силы.

О любви Максвелла к моделям уже упоминалось; это привело его к созданию своего волчка, иллюстрирующего динамику твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной точки, и его модели колец Сатурна (сейчас находящейся в Кавендишской лаборатории), иллюстрирующей движение спутников в кольцах. Он объяснил многие газовые законы с помощью взаимодействия молекул, и теперь его плодотворная изобретательность заключалась в том, чтобы представить механическую модель состояния электромагнитного поля вблизи системы проводников, по которым проходят токи.

Фарадей, как мы видели, рассматривал электростатическую и магнитную индукцию как происходящие вдоль изогнутых силовых линий. Он представляет эти линии в виде цепочек молекул, исходящих от заряженного проводника или магнита, в зависимости от обстоятельств, и действующих на другие тела поблизости. Эти цепочки молекул имеют тенденцию укорачиваться и в то же время разбухать в поперечном направлении. Таким образом, заряженный проводник стремится притянуть к себе другие тела, вдоль силовых линий возникает напряжение, в то время как в то же время каждая молекулярная трубка отталкивает своих соседей в сторону; давление под прямым углом к силовым линиям сочетается с этим напряжением. Предположив на мгновение, что это давление и натяжение существуют, можем ли мы разработать механизм для их объяснения? Сам Максвелл сравнивал силовые линии с волокнами мышцы. Когда волокна сокращаются, заставляя конечность, к которой они прикреплены, двигаться, они выпячиваются наружу, и мышца утолщается.

Опять же, с другой точки зрения, мы могли бы рассматривать силовую линию как состоящую из цепочки маленьких ячеек из некоторого гибкого материала, каждая из которых заполнена жидкостью. Если мы затем предположим, что этот ряд ячеек заставили быстро вращаться вокруг направления силовой линии, ячейки будут расширяться в поперечном направлении и сжиматься в продольном; снова возникнет напряжение вдоль линий силы и давления под прямым углом к ним. Именно этой последней идеей, как мы вскоре увидим, воспользовался Максвелл —

“Теперь я предлагаю” [он пишет (“О физических силовых линиях”, Phil. Mag., том xxi.)] “исследовать магнитные явления с механической точки зрения и определить, какие напряжения в среде или движения среды способны вызывать наблюдаемые механические явления. Если с помощью той же гипотезы мы сможем связать явления магнитного притяжения с электромагнитными явлениями и с явлениями индуцированных токов, мы найдем теорию, которая, если и не верна, то может быть доказана как ошибочная только экспериментами, которые значительно расширят наши знания об этой части физики”.

Лорд Кельвин в 1847 году дал механическое представление электрических, магнитных и гальванических сил посредством перемещений упругого твердого тела в состоянии деформации. Угловое смещение в каждой точке твердого тела было принято пропорциональным магнитной силе, и из этого была выведена связь между различными

другими электрическими величинами и движением твердого тела. Но лорд Кельвин не пытался объяснить происхождение наблюдаемых сил эффектами, вызванными этими напряжениями, а просто использовал математическую аналогию, чтобы помочь воображению в изучении того и другого.

Максвелл рассматривал магнитное действие как существующее в форме давления или растяжения, или, в более общем смысле, некоторого напряжения в некоторой среде. Таким образом, существование среды, способной оказывать воздействие на материальные тела и выдерживать значительные нагрузки, как давление, так и растяжение, является для него фундаментальной гипотезой; эта среда должна быть способна двигаться, и электромагнитные силы возникают из-за ее движения и ее напряжений.

Итак, фундаментальное предположение Максвелла состоит в том, что в магнитном поле происходит непрерывное вращение молекул вокруг силовых линий магнитного поля. Рассмотрим теперь случай однородного магнитного поля, направление которого перпендикулярно бумаге; мы должны рассматривать силовые линии как параллельные цепочки молекул, оси которых перпендикулярны бумаге. Предполагается, что каждая струна вращается в одном направлении вокруг своей оси, а угловая скорость вращения является мерой магнитной силы. Вследствие этого вращения в среде возникнут различия в давлении в разных направлениях; давление вдоль осей струн будет меньше, чем было бы, если бы среда находилась в состоянии покоя, а в направлениях, расположенных под прямым углом к осям, будет больше, среда будет вести себя так, как если бы она находилась под напряжением вдоль осей молекул под давлением под прямым углом к ним. Более того, можно показать, что давление и натяжение пропорциональны квадрату угловой скорости, то есть квадрату магнитной силы, и этот результат соответствует результатам эксперимента.

Более сложные вычисления показывают, что это утверждение верно в целом. Если мы проведем силовые линии в любом магнитном поле, а затем предположим, что молекулы среды вращаются вокруг этих силовых линий как осей со скоростями, которые в каждой точке пропорциональны магнитной силе, то распределение давления повсюду будет таким, какое, как мы знаем, действительно существует в магнитном поле.

Таким образом, согласно этой гипотезе, постоянный стержневой магнит обладает способностью приводить окружающую его среду к непрерывному молекулярному вращению вокруг силовых линий как осей. Молекулы, которые приводятся во вращение, мы можем рассматривать как сферические или почти сферические ячейки, заполненные жидкостью или упругим твердым веществом и окруженные своего рода мембраной или мешком, удерживающим содержимое вместе.

Пока модель не дает никаких сведений об электрических воздействиях, происходящих в магнитном поле.

Энергия полностью вращательная, а силы полностью магнитные.

Рассмотрим, однако, любые две смежные цепочки молекул. Пусть они разрежут бумагу, как показано в двух кругах на [рис. 1](#):—

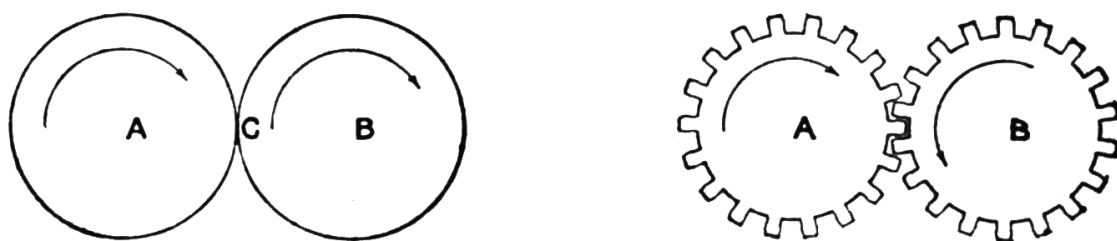


Рис. 1. Рис. 2.

Тогда обе эти ячейки вращаются в одном направлении, следовательно, в точке С, где они соприкасаются, их точки соприкосновения будут двигаться в противоположных направлениях, как показано стрелками, и трудно представить, как такое движение может продолжаться; для этого потребовалось бы, чтобы поверхности ячеек были идеально гладкими, и если бы это было так, они потеряли бы способность передавать действие от одной ячейки к другой.

Ячейки А и В можно сравнить с двумя зубчатыми колесами, расположенными близко друг к другу, которые мы хотим повернуть в одном направлении. Если зубья могут сцепляться, как на [рис. 2](#), это невозможно: следующие друг за другом колеса в поезде должны двигаться в противоположных направлениях.

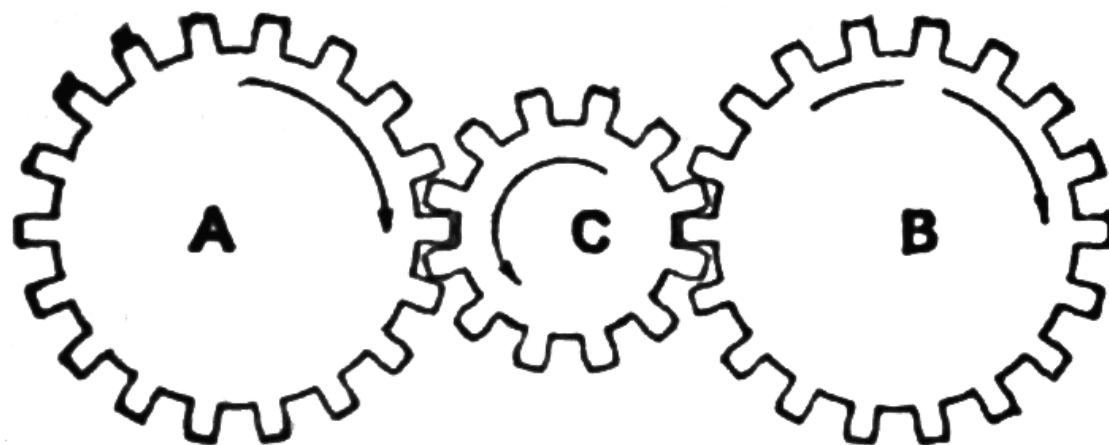


Рис. 3.

Но во многих машинах желаемая цель достигается путем установки между двумя колесами А и В третьего неработающего колеса С, как показано на [фиг. 3](#). Он может быть очень маленьким, его единственная функция - передавать движение от А к В таким образом, чтобы А и В могли поворачиваться в одном направлении. Необязательно, чтобы на колесах были зубцы; если поверхность идеально шероховатая, чтобы не было проскальзывания, то тот же результат получается и без зубцов.

Руководствуясь этой аналогией, Максвелл расширил свою модель, предположив, что каждая ячейка покрыта рядом мелких частиц, которые перекатываются по ее поверхности. Эти частицы играют роль холостых колес в машине и за счет своего вращения просто позволяют соседним частям двух ячеек двигаться в противоположных направлениях.

Рассмотрим теперь ряд таких ячеек и их холостые колеса, лежащие в плоскости, в которой находится бумага, и предположим, что каждая ячейка вращается с одинаковой угловой

скоростью вокруг оси под прямым углом к этой плоскости, на каждое холостое колесо будут действовать две равные и противоположные силы на концах диаметра, в котором его касаются соседние ячейки; следовательно, оно будет приведено во вращение, но не будет силы, стремящейся привести его в движение; не имеет значения, свободно перемещается ось, на которой оно вращается, или неподвижно, в любом случае холостое колесо просто вращается. . Но предположим теперь, что соседние ячейки не вращаются с одинаковой скоростью. В дополнение к своему вращению колесо холостого хода будет продвигаться вперед со скоростью, которая зависит от разницы между оборотами, и, если оно может двигаться свободно, оно будет перемещаться между двумя ячейками. Теперь представьте, что промежутки между ячейками снабжены чередой холостых колес. Пока соседние ячейки движутся с разной скоростью, между ними будет постоянный поток катящихся частиц или холостых колес. Максвелл в статье рассматривал эти катящиеся частицы как частицы электричества. Их движение представляет собой электрический ток. В однородном магнитном поле электрический ток отсутствует; если напряженность поля изменяется, неработающие колеса приводятся в движение и может возникнуть ток.

Эти частицы очень малы по сравнению с магнитными вихрями. Масса всех частиц незначительна по сравнению с массой вихрей, и огромное количество вихрей с окружающими их частицами содержится в молекуле среды; частицы катятся по вихрям, не касаясь друг друга, так что до тех пор, пока они остаются внутри одной и той же молекулы, не происходит потери энергии из-за сопротивления. Однако, когда происходит ток или общий перенос частиц в одном направлении, они должны переходить от одной молекулы к другой и при этом могут испытывать сопротивление и выделять тепло.

Максвелл утверждает, что концепция частицы, движение которой связано с движением вихря посредством идеального качающегося контакта, может показаться несколько неуклюжей. “Я не выдвигаю это, ” пишет он, “ как способ связи, существующий в Природе, или даже как то, с чем я охотно согласился бы в качестве электрической гипотезы. Однако это способ связи, который механически постижим и легко исследуется, и он служит для выявления фактических механических связей между известными электромагнитными явлениями, так что я осмеливаюсь сказать, что любой, кто понимает предварительный характер этой гипотезы, обнаружит, что она скорее поможет, чем помешает ему в его поисках истинной интерпретации явлений ”.

Первая часть статьи посвящена теории магнетизма; во второй части гипотеза применяется к явлениям электрических токов и показано, как из нее можно вывести известные законы постоянных токов и электромагнитной индукции. В части III, опубликованной в январе и феврале 1862 г., теория молекулярных вихрей применяется к статическому электричеству.

Предполагается, что различие между проводником и изолятором или диэлектриком заключается в том, что в первом случае частицы электричества могут с большей или меньшей свободой переходить от молекулы к молекуле. В последнем случае такой перенос невозможен, частицы могут перемещаться только внутри молекулы, с которой они связаны; предполагается, что ячейки или вихри среды эластичны и благодаря своей эластичности сопротивляются перемещению частиц внутри них. Когда электрическая сила воздействует на среду, это смещение частиц внутри каждой молекулы происходит до тех пор, пока напряжения, вызванные упругой реакцией вихрей, не уравновесят электрическую силу; среда ведет себя как упругое

тело, поддающееся давлению, пока давление не уравнивается упругим напряжением. Когда электрическая сила устраняется, ячейки или вихри восстанавливают свою форму, электричество возвращается в свое прежнее положение.

В такой среде, как эта, могли бы возникать волны периодического смещения, которые распространялись бы со скоростью, зависящей от ее электрических свойств. Значение этой скорости может быть получено из электрических наблюдений, и Максвелл показал, что эта найденная таким образом скорость была, в пределах экспериментальной погрешности, такой же, как у света. Более того, электрические колебания, подобно колебаниям света, происходят во фронте волны. Следовательно, заключает он, “эластичность магнитной среды в воздухе такая же, как и у светонесущей среды, если эти две сосуществующие, равнопрочные и одинаково эластичные среды не являются, скорее, одной средой”.

Таким образом, статья содержит первые зачатки электромагнитной теории света. Более того, показано, что притяжение между двумя небольшими телами, заряженными заданным количеством электричества, зависит от среды, в которую они помещены, в то время как удельная индуктивная способность оказывается пропорциональной квадрату показателя преломления.

В четвертой и заключительной части статьи исследуется распространение света в магнитном поле.

Фарадей показал, что направление вибрации в волне поляризованного света, распространяющейся параллельно силовым линиям в магнитном поле, изменяется при ее прохождении через это поле. Числовые законы этого соотношения были исследованы Верде, и Максвелл показал, как его гипотеза о молекулярных вихрях привела к законам, которые в основном согласуются с законами, найденными Верде.

Он указывает, что связь между магнетизмом и электричеством имеет ту же математическую форму, что и связь между некоторыми другими парами явлений, одно из которых имеет *линейный*, а другое *вращательный* характер; и, далее, что аналогия может быть проведена, предполагая либо линейный характер для магнетизма, либо вращательный характер для электричества, либо обратный. Он ссылается на проф. Теорию Чаллиса, согласно которой магнетизм должен заключаться в токах в жидкости, направления которых соответствуют силовым линиям магнитного поля, в то время как предполагается, что электрические токи сопровождаются вращательным движением жидкости вокруг оси тока, если не зависят от него; и теория фон Гельмгольца несколько аналогичного характера. Затем он приводит свои собственные доводы — соглашаясь с доводами сэра У. Томсона (лорда Кельвина) — в пользу предположения, что в магнитном поле должно происходить реальное вращение, чтобы объяснить вращение плоскости поляризации, и, принимая эти доводы как обоснованные, он развивает следствия своей теории с результатами, изложенными выше.

Его собственный вердикт относительно теории приведен в “Электричестве и магнетизме” (том ii, § 831, первое издание, стр. 416):—

“Теория молекулярных вихрей, которую я разработал довольно подробно, была опубликована в *Phil. Mag.* за март, апрель и май 1861 г.; январь и февраль 1862 г.

“Я думаю, у нас есть веские доказательства мнения о том, что в магнитном поле происходит некое явление вращения, что это вращение осуществляется большим количеством очень маленьких частиц материи, каждая из которых вращается вокруг своей собственной оси, причем эта ось параллельна направлению магнитной силы, и что вращения этих различных вихрей зависят друг от друга посредством какого-то соединяющего их механизма.

“Попытка, которую я затем предпринял представить рабочую модель этого механизма, должна быть принята не более чем за то, что она есть на самом деле, за демонстрацию того, что можно представить механизм, способный производить соединение, механически эквивалентное реальному соединению частей электромагнитного поля. Задача определения механизма, необходимого для установления заданного вида связи между движениями частей системы, всегда допускает бесконечное число решений. Некоторые из них могут быть более неуклюжими или более сложными, чем другие, но все они должны удовлетворять условиям механизма в целом.

“Однако следующие результаты теории имеют более высокую ценность:—

“(1) Магнитная сила - это эффект центробежной силы вихрей.

“(2) Электромагнитная индукция токов - это эффект сил, вступающих в действие при изменении скорости вихрей.

“(3) Электродвижущая сила возникает из-за нагрузки на соединительный механизм.

“(4) Электрическое смещение возникает из-за упругой податливости соединительного механизма”.

При изучении этой части работы Максвелла следует четко помнить, что он не рассматривал эфир как серию зубчатых колес с холостыми оборотами между ними или что-либо в этом роде. Он разработал механическую модель таких шестеренок и неработающих колес, свойства которых в некоторых отношениях были бы очень похожи на свойства эфира; из этой модели он вывел, среди прочего, тот важный факт, что электрические волны будут распространяться наружу со скоростью света. С тех пор были разработаны другие подобные модели для иллюстрации тех же законов. Проф. Фицджеральд действительно сконструировал одно из колес, соединенных между собой эластичными лентами, что ясно показывает, какие процессы, по предположению Максвелла, происходят в диэлектрике под действием электрической силы. Профессор Лодж в своей книге “Современные взгляды на электричество” очень подробно разработал несколько иное расположение зубчатых колес для достижения того же результата.

Предсказания Максвелла относительно распространения электрических волн в последние дни получили свое полное подтверждение в блестящих экспериментах Герца и его последователей; нам остается, прежде чем заняться ими, проследить их окончательное развитие в его руках.

Статьи, которые мы обсуждали, были, возможно, слишком материальными, чтобы привлечь к ним полное внимание, которого они заслуживали; эфир - это не ряд шестеренок, а электричество - это нечто отличное от материальных холостых колес. В своей статье “Динамическая теория электромагнитного поля”, *Фил. Пер.*, 1864, Максвелл рассматривает те

же вопросы в более общем виде. В одном из предыдущих случаев он говорит: “Я попытался описать особый вид движения и особый вид деформации, организованные таким образом, чтобы объяснить эти явления. В настоящей статье я избегаю любых гипотез такого рода; и, используя такие слова, как электрический импульс и электрическая упругость, по отношению к известным явлениям индукции токов и поляризации диэлектриков, я хочу просто направить ум читателя к механическим явлениям, которые помогут ему понять электрические. Все подобные фразы в настоящем документе следует рассматривать как иллюстративные, а не как пояснительные”. Затем он продолжает: —

Однако, говоря об энергии поля, я хочу, чтобы меня понимали буквально. Любая энергия - это то же самое, что и механическая энергия, независимо от того, существует ли она в форме движения, упругости или в любой другой форме.

“Энергия в электромагнитных явлениях - это механическая энергия. Вопрос только в том, где она находится?

Согласно старым теориям, он находится в наэлектризованных телах, проводящих цепях и магнитах в форме неизвестного качества, называемого потенциальной энергией, или способностью производить определенные эффекты на расстоянии. Согласно нашей теории, оно находится в электромагнитном поле, в пространстве, окружающем наэлектризованные и магнитные тела, а также в самих этих телах, и имеет две различные формы, которые можно описать без гипотез как магнитную поляризацию и электрическую поляризацию, или, согласно весьма вероятной гипотезе, как движение и деформацию одной и той же среды.

“Выводы, сделанные в настоящей работе, не зависят от этой гипотезы и выводятся из экспериментальных фактов трех видов:—

“(1) Индукция электрических токов путем увеличения или уменьшения соседних токов в соответствии с изменениями силовых линий, проходящих через цепь.

“(2) Распределение магнитной напряженности в соответствии с изменениями магнитного потенциала.

“(3) Индукция (или влияние) статического электричества через диэлектрики.

“Теперь мы можем перейти к демонстрации из этих принципов существования и законов механических сил, которые действуют на электрические токи, магниты и наэлектризованные тела, помещенные в электромагнитное поле”.

В своем введении к статье он в общих чертах обсуждает различные объяснения электрических явлений, которые были даны, и указывает, что —

“Следовательно, представляется, что определенные явления в электричестве и магнетизме приводят к тому же заключению, что и явления в оптике, а именно, что существует эфирная среда, пронизывающая все тела и изменяемая лишь в определенной степени их присутствием; что части этой среды способны приводиться в движение электрическими токами и магнитами; что это движение передается от одной части среды к другой силами, возникающими из соединения этих частей; что под действием этих сил происходит определенная податливость,

зависящая от эластичности этих соединений; и что, следовательно, энергия в двух различных формах может существовать в различных телах". среда, одна форма которой представляет собой фактическую энергию движения ее частей, а другая - потенциальную энергию, накопленную в соединениях в силу их эластичности.

Таким образом, мы приходим к концепции сложного механизма, способного совершать самые разнообразные движения, но в то же время связанного таким образом, что движение одной части зависит, согласно определенным соотношениям, от движения других частей, причем эти движения передаются силами, возникающими из-за относительного смещения соединенных частей в силу их упругости. Такой механизм должен подчиняться общим законам динамики, и мы должны быть в состоянии рассчитать все последствия его движения, при условии, что нам известна форма связи между движениями частей”.

Эти общие законы динамики, применимые к движению любой связанной системы, были разработаны Лагранжем и выражены в его обобщенных уравнениях движения. Одна из главных претензий Максвелла на славу состоит в том, что он увидел в электрическом поле связанную систему, к которой можно применить уравнения Лагранжа, и что он смог вывести механические и электрические действия, которые происходят, с помощью фундаментальных положений динамики.

Методы обсуждаемой статьи получили дальнейшее развитие в “Трактате об электричестве и магнетизме”, опубликованном в 1873 году; попытаюсь дать некоторый краткий отчет о работе Максвелла, мы опишем ее в той форме, которую она в конечном итоге приняла.

Задача, которую поставил перед собой Максвелл, была двойной; сначала он должен был выразить в символах, в возможно более общей форме, фундаментальные законы электромагнетизма, выведенные из экспериментов, главным образом экспериментов Фарадея, и соотношения между различными действующими величинами; когда это было сделано, он должен был показать, как эти законы могут быть выведены из общих динамических законов, применимых к любой системе движущихся тел.

Существуют два класса явлений, электрические и магнитные, которые были известны с очень ранних времен и которые связаны друг с другом. Когда кусочек сургуча натирают, оказывается, что он притягивает другие тела, говорят, что он оказывает электрическую силу во всем пространстве, окружающем его; когда два разных металла опускают в слегка подкисленную воду и соединяют проволокой, в пластинах, воде, проволоке и пространстве вокруг проволоки происходят определенные изменения, снова проявляется электрическая сила, и говорят, что по проволоке течет электрический ток. Опять же, определенные тела, такие как магнит или куски железа и стали, обработанные определенным образом, проявляют явления действия на расстоянии: говорят, что они проявляют магнитную силу, и обнаружено, что эта магнитная сила существует вблизи электрического тока и связана с током.

Опять же, когда к телу прикладывается электрическая сила, эффекты могут быть частично электрическими, частично механическими; электрическое состояние тела в целом изменяется, в то время как, кроме того, устанавливаются механические силы, приводящие тело в движение. Эксперимент должен научить нас, как электрическое состояние зависит от электрической силы и какова связь между этой электрической силой и магнитными силами, которые при

определенных обстоятельствах могут наблюдаться. Теперь, при определении электрического и магнитного состояний системы, необходимо будет ввести различные другие величины, в дополнение к электрической силе; первый шаг - сформулировать необходимые величины и определить соотношения между ними и электрической силой.

Рассмотрим теперь провод, соединяющий два полюса электрической батареи — в ее простейшей форме кусочек цинка и кусочек меди в сосуде с разбавленной кислотой — электрическая сила создается в каждой точке провода. Предположим, эта сила известна; по ней протекает электрический ток, зависящий от материала и размера проволоки, его величина может быть определена в каждой точке проволоки в терминах электрической силы по закону Ома. Если мы примем либо этот ток, либо электрическую силу как известные, мы сможем определить по известным законам электрические и магнитные условия в других местах. Если мы предположим, что провод прямой и очень длинный, то, пока ток постоянный, и мы пренебрегаем небольшим эффектом, вызванным электростатическим зарядом на проводе, электрическая сила вне провода отсутствует. Однако существует магнитная сила, и обнаружено, что силовые линии магнитного поля представляют собой окружности вокруг проволоки. Обнаружено также, что работа, совершаемая при прохождении один раз полностью по проводу против магнитной силы, измеряется током, протекающим по проводу, и получается в системе единиц, обычно принятой путем умножения тока на 4π . Этот последний результат затем дает нам одно из необходимых соотношений, а именно соотношение между магнитной силой, обусловленной током, и силой тока.

Опять же, рассмотрим постоянный ток, протекающий в проводнике любой формы, общий ток через любое сечение проводника может быть измерен различными способами, и будет обнаружено, что в любой момент времени этот общий ток одинаков для каждого сечения проводника. В этом отношении течение тока напоминает течение несжимаемой жидкости по трубе; там, где труба узкая, скорость потока больше, чем там, где труба широкая, но общее количество, проходящее через каждую секцию в любой данный момент, одинаково.

Рассмотрим теперь два проводящих тела, две сферы или две плоские пластины, расположенные близко друг к другу, но изолированные. Пусть каждый проводник будет соединен с одним из полюсов батареи проводящим проводом. Затем, в течение очень короткого промежутка времени после установления контакта, обнаруживается, что в каждом проводе есть ток, который быстро гаснет до нуля. По соседству с шарами действует электрическая сила; говорят, что шары заряжены электричеством, а силовые линии представляют собой изогнутые линии, идущие от одного шара к другому. Обнаружено, что шары слегка притягивают друг друга, и пространство между ними теперь находится в состоянии, отличном от того, в котором оно было до того, как шары были заряжены. Согласно Максвеллу, в этом пространстве было произведено *электрическое смещение*, и электрическое смещение в каждой точке пропорционально электрической силе в этой точке.

Таким образом, (i) когда электрическая сила действует на проводник, она производит ток, причем ток по закону Ома пропорционален силе: (ii) когда она действует на изолятор, она производит электрическое смещение, и смещение пропорционально силе; в то время как (iii) вблизи от тока действует магнитная сила, и работа, выполняемая при прохождении магнитного полюса по любой замкнутой цепи, связанной с током, пропорциональна току. Первые два из этих принципов дают нам две системы уравнений, связывающих вместе

электрическую силу и ток в проводнике или смещение в диэлектрике соответственно; третий связывает магнитную силу и ток.

Теперь давайте вернемся к переменному периоду, когда ток течет по проводам; и чтобы уточнить идею, пусть два проводника представляют собой две равные большие плоские пластины, расположенные параллельными гранями на некотором небольшом расстоянии друг от друга. В этом случае, когда пластины заряжены и ток прекратился, электрическое смещение и сила почти полностью ограничены пространством между пластинами. В течение переменного периода общий поток в любой момент времени через каждое сечение провода одинаков, но в обычном смысле этого слова электрический ток через изолирующую среду между пластинами не проходит. Однако в этом пространстве электрическое смещение непрерывно изменяется, повышаясь от первоначального нуля до своего конечного устойчивого значения, когда ток прекращается. Фундаментальной частью теории Максвелла является то, что это изменение электрического смещения эквивалентно во всех отношениях току. Ток в любой точке диэлектрика измеряется скоростью изменения смещения в этой точке.

Более того, важным моментом также является то, что если мы рассмотрим любое сечение диэлектрика между двумя пластинами, то скорость изменения общего смещения по этому сечению в каждый момент времени равна общему протеканию тока по каждому сечению проводящего провода.

Следовательно, электрические токи, включая токи смещения, всегда протекают в замкнутых контурах и подчиняются законам несжимаемой жидкости в том смысле, что общий поток через каждую секцию цепи — проводящую или диэлектрическую — в любой момент одинаков.

Следует четко помнить, что эта фундаментальная гипотеза теории Максвелла является предположением, которое может быть подтверждено только экспериментально. Фон Гельмгольц в своей статье “Уравнения движения электричества для тел в состоянии покоя” сформулировал свои уравнения совершенно иным образом, чем Максвелл, и пришел к результатам более общего характера, которые не требуют от нас предполагать, что токи всегда протекают в замкнутых цепях, но допускают конденсацию электричества в точках цепи, где заканчиваются проводники и начинается непроводящая часть цепи. Мы оставляем пока вопрос о том, какая из двух теорий, если таковая имеется, отражает факты.

Выше мы получили три фундаментальных соотношения: (i) соотношение между электрической силой и электрическим током в проводнике; (ii) соотношение между электрической силой и электрическим смещением в диэлектрике; (iii) соотношение между магнитной силой и током, который ее порождает. И мы видели, что электрический ток — *то есть* изменение напряженности силового электрического поля в диэлектрике — приводит к возникновению магнитной силы. Итак, магнитная сила, действующая на среду, производит “магнитное смещение”, или магнитную индукцию, как это еще называют. Во всех средах, за исключением железа, никеля, кобальта и некоторых других веществ, магнитная индукция пропорциональна магнитной силе, и соотношение между магнитной индукцией, создаваемой данной силой, и самой силой оказывается почти одинаковым для всех таких сред. Это соотношение известно как проницаемость и обычно обозначается символом μ .

Можно было бы предположить соотношение, обратное приведенному в пункте iii) выше, и оно, фактически, было открыто Фарадеем. Изменения в поле магнитной индукции приводят к

возникновению электрической силы и, следовательно, к токам смещения в диэлектрике или к токам проводимости в проводнике. Рассматривая связь между этими изменениями и электрической силой, проще всего сначала не иметь дела с магнитными веществами, такими как железо, никель или кобальт; и тогда мы можем сказать, что (iv) работа, которая в любой момент была бы проделана при переносе единичного количества электричества по замкнутой цепи в магнитном поле против электрических сил, создаваемых полем, равна скорости уменьшения общей магнитной индукции, пронизывающей цепь. Этот закон, подводящий итог экспериментам Фарадея по электромагнитной индукции, дает четвертый принцип, ведущий к четвертой серии уравнений, связывающих воедино электрические и магнитные величины.

Уравнения, выведенные из вышеупомянутых четырех принципов, вместе с условием непрерывности электрического тока, составляют уравнения Максвелла для электромагнитного поля.

Если мы имеем дело только с диэлектрической средой, взаимную связь между третьим и четвертым принципами можно сделать более ясной с помощью следующего утверждения:—

(A) Работа, совершаемая в любой момент при переносе единичного количества магнетизма по замкнутому контуру в поле, в котором изменяется электрическое смещение, равна скорости изменения общего электрического смещения по контуру, умноженной на 4π .⁶²

(B) работа, выполняемая в любой момент при передаче единичного количества электроэнергии по цепи в поле, в котором магнитная индукция изменяется, равна скорости изменения общей магнитной индукции по цепи.

Исходя из этих двух принципов в сочетании с законами, связывающими электрическую силу и перемещение, магнитную силу и индукцию, а также с условием непрерывности, Максвелл получил свои уравнения поля.

Эксперименты Фарадея по электромагнитной индукции служат доказательством истинности четвертого принципа. Из этих экспериментов следует, что когда количество линий магнитной индукции, которые связаны с какой-либо замкнутой цепью, изменяется, в этой цепи возникает индуцированная электродвижущая сила. Согласно результатам Фарадея, эта электродвижущая сила измеряется скоростью уменьшения количества линий магнитной индукции, пронизывающих цепь. Максвелл применяет этот принцип ко всем цепям, независимо от того, проводящие они или нет.

Получая уравнения, выражающие в символах результаты только что изложенного четвертого принципа, Максвелл вводит новую величину, которой он дает название “векторный потенциал”. Эта величина фигурирует в его анализе, и ее физический смысл поначалу не совсем ясен. Профессор Пойнтинг, однако, изложил принципы Максвелла в несколько иной форме, что позволяет нам определенно видеть значение векторного потенциала и легче выводить уравнения Максвелла из фундаментальных утверждений.

Мы имеем дело со схемой, с которой связаны линии магнитной индукции, при этом количество таких линий, связанных со схемой, варьируется. Теперь давайте предположим, что изменение происходит из-за того, что линии индукции движутся наружу или внутрь, в зависимости от обстоятельств, чтобы разорвать цепь. Изначально с цепью ничего не было связано. По мере того как магнитное поле возрастало до своей нынешней напряженности, линии магнитной

индукции перемещались внутрь. Каждый маленький элемент схемы был кем-то вырезан, и общее количество, связанное со схемой, можно найти, сложив вместе те, которые были вырезаны каждым элементом. Итак, утверждение профессора Пойнтинга о четвертом принципе Максвелла состоит в том, что электрическая сила, действующая в направлении любого элемента цепи, определяется путем деления на длину элемента количества линий магнитной индукции, которые он перерезает за одну секунду.

Более того, общее количество линий магнитной индукции, которые были перерезаны элементом единичной длины, определяется как составляющая векторного потенциала в направлении элемента; следовательно, электрическая сила в любом направлении представляет собой скорость уменьшения составляющей векторного потенциала в этом направлении. Таким образом, у нас есть физическое значение векторного потенциала, и мы обнаружим, что в динамической теории эта величина имеет большое значение.

Профессор Пойнтинг аналогичным образом модифицировал третий принцип Максвелла; он рассматривает изменение электрического смещения как результат движения трубок электрической индукции,⁶³ а магнитная сила вдоль любого контура равна количеству трубок электрической индукции, разрезанных на единицу длины контура в секунду, умноженному на 4π .

Из уравнений поля, найденных Максвеллом, можно вывести два набора симметричных уравнений. Один набор связывает скорость изменения электрической силы с величинами, зависящими от магнитной силы; другой набор аналогичным образом связывает скорость изменения магнитной силы с величинами, зависящими от электрической силы. Несколько авторов в последние годы принимают эти уравнения в качестве фундаментальных соотношений поля, обосновывая их аргументом, что они приводят к последствиям, которые, как оказывается, согласуются с экспериментом.

Мы попытались дать некоторый отчет об историческом методе Максвелла, согласно которому уравнения выводятся из законов электрических токов и электромагнитной индукции, полученных непосредственно из эксперимента.

Хотя способ, которым Максвелл получил свои уравнения, полностью принадлежит ему, он был не одинок в формулировании и обсуждении общих уравнений электромагнитного поля. Однако следующие шаги, которые мы собираемся рассмотреть, в особой степени связаны с ним. Электрическая или магнитная система является вместилищем энергии; эта энергия частично электрическая, частично магнитная, и для нее можно найти различные выражения. В теории Максвелла фундаментальным предположением является то, что энергия имеет положение. "Следовательно, электрическая и магнитная энергии любой электромагнитной системы, - говорит профессор Пойнтинг, - находятся где-то в поле". Из этого следует, что они присутствуют везде, где можно показать существование электрической и магнитной силы. Максвелл показал, что вся электрическая энергия учитывается, предположив, что в окрестности точки, в которой электрическая сила равна R , количество энергии на единицу объема равно $KR^2/8\pi$, где K - индуктивная способность среды, в то время как в окрестности точки, в которой магнитная сила равна H , магнитная энергия на единицу объема равна $\mu H^2/8\pi$, где μ - проницаемость. Таким образом, он предполагает, что в каждой точке электромагнитной системы энергия накапливается в соответствии с этими законами. Из этого следует, что электромагнитное поле напоминает динамическую систему, в которой накапливается энергия. Можем ли мы узнать

больше о механизме, с помощью которого поддерживаются действия в поле? Теперь движение любой точки связанной системы зависит от движения других точек системы; как правило, в любой машине имеется определенное количество точек, называемых управляющими точками, движение которых управляет движением всех других частей машины; если известно движение управляющих точек, то можно определить движение любой другой точки. Таким образом, в паровой машине движение точки на маховике может быть обнаружено, если известно движение поршня и соединения между поршнем и колесом.

Чтобы определить силу, действующую на любую часть машины, мы должны найти ее импульс, а затем вычислить скорость, с которой этот импульс изменяется. Эта скорость изменения даст нам силу. Метод расчета, который необходимо использовать, был впервые предложен Лагранжем, а затем разработан, с некоторыми изменениями, Гамильтоном. Обычно это называют принципом Гамильтона; когда используются уравнения в исходной форме, они известны как уравнения Лагранжа.

Теперь Максвелл показал, как эти методы расчета могут быть применены к электромагнитному полю. Энергия динамической системы частично кинетическая, частично потенциальная. Максвелл предполагает, что магнитная энергия поля - это кинетическая энергия, потенциальная электрическая энергия. Когда известна кинетическая энергия системы, импульс любой части системы может быть рассчитан с помощью известных процессов. Таким образом, если мы рассмотрим цепь в электромагнитном поле, мы можем вычислить энергию поля и, следовательно, получить импульс, соответствующий этой цепи. Если мы имеем дело с простым случаем, в котором проводящие цепи зафиксированы в определенном положении, и только ток в каждой цепи может изменяться, скорость изменения импульса, соответствующая любой цепи, будет давать силу в этой цепи. Рассматриваемый импульс - это электрический импульс, а сила - электрическая сила. Теперь мы уже видели, что электрическая сила в любой точке проводящей цепи определяется скоростью изменения векторного потенциала в рассматриваемом направлении. Следовательно, мы приходим к отождествлению векторного потенциала с электрическим импульсом нашей динамической системы; и, обращаясь к первоначальному определению векторного потенциала, мы видим, что электрический импульс цепи измеряется количеством линий магнитной индукции, которые взаимосвязаны с ней.

Опять же, кинетическая энергия динамической системы может быть выражена через квадраты и произведения скоростей нескольких ее частей. Это также может быть выражено путем умножения скорости каждой движущей точки на импульс, соответствующий этой движущей точке, и взятия половины суммы произведений. Предположим теперь, что мы имеем дело с системой, состоящей из нескольких проводных цепей, в которых протекают токи, и давайте предположим, что мы можем представить ток в каждом проводе как скорость движущей точки в нашей динамической системе. Мы также можем выразить в терминах этих токов электрический импульс каждой проволочной цепи; пусть это будет сделано, и пусть образуется половина суммы произведений соответствующих скоростей и импульсов.

При поддержании токов в проводах требуется энергия для подвода тепла, которое вырабатывается в каждом проводе; но при запуске токов обнаруживается, что требуется больше энергии, чем требуется для подвода этого тепла. Этот избыток энергии может быть вычислен, и когда расчет произведен, оказывается, что избыток равен половине суммы произведений токов и соответствующих импульсов. Более того, если эту сумму выразить в терминах магнитной силы,

то окажется, что она равна $\mu H^2 / 8 \pi$, что является магнитной энергией поля. Теперь, когда динамическая система приводится в движение против известных сил, подается больше энергии, чем необходимо для выполнения работы против сил; этот избыток энергии измеряет кинетическую энергию, приобретаемую системой.

Следовательно, Максвелл был прав, приняв магнитную энергию поля за кинетическую энергию механической системы, и если принять силу токов в проводах за представление скоростей приводных точек, эта энергия измеряется в терминах электрических скоростей и импульсов точно так же, как энергия механической системы измеряется в терминах скоростей и импульсов ее приводных точек.

Механической системой, в которой, согласно Максвеллу, накапливается энергия, является эфир. Состояние движения или деформации устанавливается в эфире поля. Электрические силы, которые приводят в действие токи, а также механические силы, действующие на проводники, несущие токи, обусловлены этим состоянием движения, или оно может быть напряженным, в эфире. Не следует предполагать, что термин "электрическое смещение" в сознании Максвелла означал реальное телесное смещение частиц эфира; это каким-то образом связано с таким материальным смещением. По его мнению, без движения эфирных частиц не было бы электрического воздействия, но он не отождествляет электрическое смещение и перемещение эфирной частицы.

Его механическая теория, однако, учитывает электромагнитные силы между проводниками, по которым проходят токи. Энергия системы зависит от взаимного расположения токов, которые составляют ее часть. Итак, любая консервативная механическая система стремится занять такое положение, при котором ее потенциальная энергия будет наименьшей, а кинетическая - наибольшей. Таким образом, контуры системы будут стремиться установить себя таким образом, чтобы электрокинетическая энергия системы была как можно больше; потребуются силы, чтобы удерживать их в любом положении, в котором это условие не выполняется.

У нас есть еще одно доказательство правильности найденного значения энергии поля в том, что силы, рассчитанные на основе этого значения, согласуются с силами, определенными прямым экспериментом.

Опять же, усилия, приложенные в различных точках движения, передаются на другие точки соединения машины; соединения находятся в состоянии растяжения; напряжение присутствует во всем их содержимом. Когда мы видим поршневой шток и вал двигателя, соединенные кривошипом и шатуном, мы понимаем, что работа, выполняемая поршнем, передается таким образом на вал. Точно так же и в электромагнитном поле эфир образует связь между различными контурами в поле; силы, с которыми эти контуры воздействуют друг на друга, передаются от одного контура к другому за счет напряжений, создаваемых в эфире.

В качестве другого примера рассмотрим электростатическое притяжение между двумя заряженными телами. Предположим, тела заряжены путем подключения каждого к противоположному полюсу батареи; от батареи течет ток, вызывающий электрическое смещение в пространстве между телами и приводящий эфир в состояние напряжения. По мере увеличения напряжения ток уменьшается; реакция, возникающая в результате напряжения, имеет тенденцию останавливать его, пока, наконец, эта реакция не станет настолько сильной, что ток прекратится. В этом случае провода к батарее могут быть отсоединены, при условии, что

это сделано без повреждения изоляции корпусов; состояние напряжения останется и проявится в притяжении между шариками.

Рассматривая проблему таким образом, мы сталкиваемся с двумя важными вопросами— первый: каково состояние напряжения в эфире, которое позволит ему создавать наблюдаемые электростатические притяжения и отталкивания между заряженными телами? и другой вопрос: какова механическая структура эфира, которая привела бы к такому напряженному состоянию, которое объясняло бы наблюдаемые силы? Максвелл дает один ответ на первый вопрос; это не единственный ответ, который можно было бы дать, но он учитывает факты. Он не смог ответить на второй. Он говорит (“Электричество и магнетизм”, том I, стр. 132): —

“Следует тщательно учитывать, что мы сделали только один шаг в теории действия среды. Мы предположили, что он находится в состоянии стресса, но никоим образом не объяснили этот стресс и не объяснили, как он поддерживается.... Я не смог сделать следующий шаг, а именно объяснить механическими соображениями эти напряжения в диэлектрике”.

Фарадей указал, что индуктивное действие между двумя телами происходит вдоль силовых линий, которые имеют тенденцию укорачиваться по своей длине и распространяться наружу в других направлениях. Максвелл сравнивает их с волокнами мышцы, которые сокращаются и в то же время утолщаются при приложении силы. Согласно теории Максвелла, в электрическом поле существует напряжение вдоль электрических силовых линий и давление под прямым углом к этим линиям. Максвелл доказал, что натяжение $K R^2 / 8 \pi$ вдоль силовых линий в сочетании с равным давлением в перпендикулярных направлениях будет поддерживать равновесие поля и приведет к наблюдаемому притяжению или отталкиванию между наэлектризованными телами. Можно было бы найти другие распределения напряжений, которые привели бы к тому же результату. Только что указанное всегда будет связано с именем Максвелла. Следует отметить, что натяжение вдоль силовых линий и давление под прямым углом к ним численно равны потенциальной энергии, запасенной на единицу объема в поле. Значение каждой из трех величин равно $K R^2 / 8 \pi$.

Точно так же в магнитном поле существует состояние напряжения, и, согласно теории Максвелла, оно тоже состоит из напряжения вдоль силовых линий и равного давления под прямым углом к ним, при этом значения напряжения и давления равны магнитной энергии на единицу объема, или $\mu H^2 / 8 \pi$.

В случае, когда существует как электрическая, так и магнитная сила, эти два состояния напряжения накладываются друг на друга. Общая энергия на единицу объема равна $K R^2 / 8 \pi + \mu H^2 / 8 \pi$; общее напряжение складывается из напряжений $K R^2 / 8 \pi$ и $\mu H^2 / 8 \pi$ вдоль линий электрической и магнитной силы соответственно и равных давлений под прямым углом к этим линиям.

Таким образом, из теории Максвелла мы видим, что электрическая сила, возникающая в любой данной точке пространства, передается из этой точки под действием эфира. Напрашивается вопрос: требует ли передача времени, и если да, то происходит ли она с определенной скоростью в зависимости от природы среды, через которую происходит изменение?

Согласно молекулярно-вихревой теории, мы видели, что электрические волны передаются с определенной скоростью. Более общая теория, разработанная в “Электричестве и магнетизме”, приводит к тому же результату. Электрическая сила, создаваемая в любой точке,

распространяется наружу из этой точки со скоростью, заданной $1/\sqrt{\epsilon\mu}$ (К μ). В удаленной точке сила равна нулю, пока возмущение не достигнет ее. Если возмущение длится только в течение ограниченного интервала, его воздействие в любой момент времени в будущем будет ограничено пространством внутри сферической оболочки постоянной толщины, зависящей от интервала; радиусы этой оболочки увеличиваются с равномерной скоростью $1/\sqrt{\epsilon\mu}$ (К μ).

Если начальное возмущение периодическое, периодические волны электрической силы будут исходить из центра, подобно тому, как звуковые волны исходят от колокола или волны света от пламени свечи. Провод, по которому проходит переменный ток, может быть таким источником периодических возмущений, и от провода волны распространяются наружу, в пространство.

Теперь известно, что в звуковой волне смещения частиц воздуха происходят в направлении распространения волны; они расположены под прямым углом к фронту волны и называются продольными. С другой стороны, в световых волнах смещения, как доказал Френель, происходят во фронте волны под прямым углом, то есть к направлению распространения; они поперечные.

Теория показывает, что в общем случае обе эти волны могут существовать в упругом твердом теле и что они распространяются с разными скоростями. какой природы волны электрического смещения в диэлектрике? Можно показать, что из взглядов Максвелла на замкнутый характер всех электрических токов следует, как необходимое следствие, что волны электрического смещения являются поперечными. Электрические колебания, подобно колебаниям света, происходят во фронте волны и под прямым углом к направлению распространения; они зависят от жесткости или квазижесткости среды, через которую они проходят, а не от ее сопротивления сжатию.

Опять же, электрический ток, будь то из-за изменения смещения в диэлектрике или из-за проводимости в проводнике, сопровождается магнитной силой. Таким образом, волна периодического электрического смещения будет также волной периодической магнитной силы, распространяющейся с той же скоростью; и Максвелл показал, что направление этой магнитной силы также лежит во фронте волны и всегда находится под прямым углом к электрическому смещению. В обычной теории света волна линейного смещения сопровождается волной периодического углового поворота вокруг направления, лежащего во фронте волны и перпендикулярного линейному смещению.

Таким образом, во многих отношениях волны электрического смещения напоминают волны света, и, действительно, по мере продвижения мы обнаружим еще более тесные связи. Отсюда вытекает электромагнитная теория света Максвелла.

Только в диэлектрических средах электрическая сила распространяется волновым движением. В проводниках, хотя третий и четвертый принципы Максвелла, приведенные на странице 185, все еще верны, соотношение между электрической силой и электрическим током отличается от того, которое имеет место в диэлектрике. Следовательно, уравнения, которым удовлетворяет сила, различны. Законы ее распространения скорее напоминают законы теплопроводности, чем законы прохождения света.

Опять же, свет распространяется с разной скоростью в разных прозрачных средах. Скорость электрических волн, как было указано, равна $1/\sqrt{\epsilon}$ (мкк); но при этом предполагается, что простые законы, которые действуют там, где нет плотной материи — или, скорее, там, где воздух является единственным диэлектриком, с которым мы имеем дело, — действуют также в твердых или жидких диэлектриках. В твердом теле или жидкости, как и в вакууме, волны распространяются эфиром. В качестве первого шага к построению полной теории мы предполагаем, что в той мере, в какой речь идет об электрических волнах, единственный эффект, производимый веществом, проявляется в изменении индуктивной способности или проницаемости. Маловероятно, что такое предположение должно быть полной правдой, и поэтому мы можем ожидать, что результаты, выведенные из него, будут лишь приближением к истинному результату.

Итак, электромагнитные эксперименты показывают, что, за исключением магнитных веществ, проницаемость всех тел почти одинакова и очень незначительно отличается от проницаемости воздуха. Однако индуктивная способность разных тел различна, и, следовательно, скорость, с которой распространяются электромагнитные волны, различна в разных телах.

Но преломление волн света зависит от того факта, что свет распространяется с разной скоростью в разных средах; следовательно, мы должны ожидать отражения и преломления волн электрического смещения, когда они проходят от одного диэлектрика, такого как воздух, к другому, такому как стекло или гуттаперча; более того, для света показатель преломления среды, такой как стекло, равен отношению скорости в воздухе к скорости в стекле.

Таким образом, электрический показатель преломления стекла — это отношение скорости электрических волн в воздухе к их скорости в стекле.

Теперь пусть k_0 — индуктивная способность воздуха, k_1 — стекла, принимая проницаемость воздуха и стекла одинаковой, мы получаем результат, который —

Электрический показатель преломления = $\sqrt{(K_1/K_0)}$.

Но отношение индуктивной способности стекла к индуктивной способности воздуха известно как удельная индуктивная способность стекла.

Следовательно, удельная индуктивная способность любой среды равна квадрату электрического показателя преломления этой среды.

Со времен Максвелла математические законы отражения и преломления электрических волн исследовались различными авторами, и было показано, что они в точности согласуются с теми, которые сформулировал Френель для света.

До сих пор мы обсуждали распространение электрических волн в изотропной среде, которая обладает одинаковыми свойствами во всех направлениях относительно точки. Давайте теперь рассмотрим, как изменяются эти законы, если диэлектрик имеет кристаллическую структуру.

Максвелл предполагает, что кристаллический характер диэлектрика может быть в достаточной степени представлен предположением, что индуктивная способность различна в разных направлениях; с тех пор эксперименты показали, что это верно для таких кристаллов, как

исландский шпат и арагонит; он также предполагает, и это тоже подтверждается экспериментом, что магнитная проницаемость не зависит от направления. Из этих предположений следует, что кристалл будет производить двойное преломление и поляризацию падающих на него электрических волн, и, более того, что законы двойного преломления будут аналогичны законам Френеля для световых волн в среде с двойным преломлением. В кристалле будут две волны. Возмущение в каждом из них будет плоскополяризовано; их скорость и положение плоскости поляризации можно точно определить по направлению, в котором они движутся, с помощью конструкции Френеля.

Таким образом, теория Максвелла, по-видимому, указывает на некоторую тесную связь между электрическими волнами и волнами света. Эксперименты Фарадея по вращению плоскости поляризации под действием магнитной силы показывают одно явление, в котором эти два явления связаны, и Максвелл попытался применить свою теорию для объяснения этого. Здесь, однако, возникла необходимость ввести дополнительную гипотезу — должна быть какая-то связь между движением эфира, которому обязана магнитная сила, и тем, что составляет свет. Невозможно дать механический отчет о вращении плоскости поляризации без некоторого предположения относительно связи между этими двумя видами движения. Следовательно, Максвелл предполагает, что линейные перемещения точки в эфире являются теми, которые порождают свет, в то время как компоненты магнитной силы связаны с ними таким же образом, как компоненты вихря в жидкости при вихревом движении связаны со смещениями жидкости. Далее он предполагает существование члена особой формы в выражении для кинетической энергии и из этих предположений выводит законы распространения поляризованного света в магнитном поле. Эти законы в основном согласуются с результатами экспериментов Верде.

ГЛАВА X. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА.

На предыдущих страницах мы попытались дать некоторый отчет о вкладе Максвелла в теорию электричества и физику эфира. Теперь мы должны очень кратко рассмотреть, какие имеются свидетельства в поддержку этих взглядов. На момент смерти Максвелла такие свидетельства, хотя и убедительные, были косвенными. Его сторонники ограничивались несколькими англоговорящими учениками, молодыми и полными энтузиазма, которые были убеждены, возможно, в немалой степени, любовью и почтением, с которыми они относились к своему учителю. За границей его взгляды продвинулись очень мало.

В последних словах своей книги он пишет, говоря о различных выдающихся работниках:

“По-видимому, в умах этих выдающихся людей существует некоторое предубеждение или *априорное* возражение против гипотезы о среде, в которой происходят явления излучения света и тепла, а также электрические действия на расстоянии. Это правда, что когда-то у тех, кто размышлял о причинах физических явлений, была привычка объяснять каждый вид действия на расстоянии с помощью особого эфирного флюида, функцией и свойством которого было

производить эти действия. Они три или четыре раза заполняли все пространство эфирами различных видов, свойства которых были изобретены просто для "сохранения видимости", так что более рациональные исследователи были готовы скорее принять не только определенный закон Ньютона о притяжении на расстоянии, но даже догму Котса, [64](#) что действие на расстоянии является одним из первичных свойств материи, и что никакое объяснение не может быть более понятным, чем этот факт. Следовательно, волновая теория света встретила много возражений, направленных не против ее неспособности объяснить явления, а против ее предположения о существовании среды, в которой распространяется свет.

“Мы видели, что математическое выражение для электродинамического действия привело, по мнению Гаусса, к убеждению, что теория распространения электрического действия во времени будет признана самым краеугольным камнем электродинамики. Теперь мы не можем представить себе распространение во времени иначе, как либо как полет материальной субстанции в пространстве, либо как распространение состояния движения, или напряжения, в среде, уже существующей в пространстве.

“В теории Неймана математическая концепция, называемая потенциалом, которую мы не можем представить как материальную субстанцию, предполагается, что она передается от одной частицы к другой способом, который совершенно независим от среды и который, как указал сам Нейман, чрезвычайно отличается от распространения света.

“В теориях Римана и Бетти, по-видимому, предполагается, что действие распространяется способом, несколько более сходным со светом.

Но во всех этих теориях естественным образом возникает вопрос: — Если что-то передается от одной частицы к другой на расстояние, каково его состояние после того, как оно покинуло одну частицу и до того, как достигло другой? Если это нечто является потенциальной энергией двух частиц, как в теории Неймана, то как мы можем представить себе эту энергию существующей в точке пространства, не совпадающей ни с одной частицей, ни с другой? Фактически, всякий раз, когда энергия передается от одного тела к другому во времени, должна существовать среда или субстанция, в которой энергия существует после того, как она покидает одно тело и до того, как достигает другого, поскольку энергия, как заметил Торричелли [65](#), "является квинтэссенцией настолько тонкой природы, что ее нельзя вместить ни в какой сосуд, кроме самой сокровенной субстанции материальных вещей". Следовательно, все эти теории приводят к концепции среды, в которой происходит распространение, и если мы примем эту среду в качестве гипотезы, я думаю, что она должна занимать видное место в наших исследованиях, и что мы должны попытаться построить мысленное представление всех деталей ее действия, и это было моей постоянной целью в этом трактате”.

Давайте посмотрим, каковы были экспериментальные основания во времена Максвелла для признания истинными его взглядов на электрическое действие, и как с тех пор, благодаря гению Генриха Герца и трудам его последователей, эти основания стали настолько надежными, что почти весь прогресс науки об электричестве за последние двадцать лет состоял в развитии идей, которые можно найти в “Трактате об электричестве и магнетизме”.

Чисто электрические следствия теории Максвелла, конечно, соответствовали всем известным электрическим наблюдениям. Уравнения поля учитывали электромагнитные силы, наблюдавшиеся в различных экспериментах, и из них можно было правильно вывести законы

электромагнитной индукции; но в этом не было ничего особенного. Аналогичные уравнения были получены из теории действия на расстоянии различными авторами; фактически, теория Гельмгольца, основанная на наиболее общей форме выражения силы между двумя элементами тока, согласующейся с определенными экспериментами Ампера, была более общей по своему характеру, чем теория Максвелла. Разрушительными чертами теории Максвелла были:

(1) Предположение, что все токи протекают в замкнутых цепях.

(2) Идея энергии, присутствующей во всем электромагнитном поле вследствие деформаций и напряжений, создаваемых в электромагнитной среде в результате действий, которым она подвергалась.

(3) отождествление этой электромагнитной среды со светоносным эфиром и вытекающее из этого представление о том, что свет является электромагнитным явлением.

(4) Точка зрения, согласно которой электромагнитные силы возникают исключительно из деформаций и напряжений, возникающих в эфире; электростатический заряд изолированного проводника является одной из форм, в которых для нас проявляется деформация эфира.

(5) Говорят, что диэлектрик под действием электрической силы поляризуется, и, согласно Максвеллу (том I., стр. 133), любая электризация является остаточным эффектом поляризации диэлектрика.

Теперь, я думаю, следует признать, что во времена Максвелла было получено прямое доказательство очень немногих из этих положений. Никто еще не измерил токи смещения в диэлектрике настолько, чтобы показать, что общий поток через каждую секцию цепи в любой данный момент одинаков, хотя существуют другие эксперименты косвенного характера, которые теперь полностью подтвердили гипотезу Максвелла. Эксперименты Шиллера и фон Гельмгольца доказывают, что верно, что некоторое действие в диэлектрике должно приниматься во внимание в любой удовлетворительной теории; следовательно, они опровергают различные теории, основанные на прямом воздействии на расстоянии, “но они ничего не говорят нам о том, верна ли какая-либо особая форма теории диэлектрика, такая как теория Максвелла или Гельмгольца”. (Дж. Дж. Томсон, “Отчет по электрическим теориям”, Отчет Б.А., 1885, стр. 149.)

Когда умер Максвелл, экспериментальных данных о напряжениях, создаваемых в теле электрической силой, было мало, если вообще были какие-либо экспериментальные данные. Фонтана, Гови и Дутер все наблюдали, что происходят изменения в объеме диэлектрика конденсатора, когда он заряжен. Квинке взялся за эту работу, и первая из его классических работ на эту тему была опубликована в 1880 году, через год после смерти Максвелла. Сам Максвелл любил показывать эксперимент, в котором заряженную изолированную сферу подносили близко к поверхности парафина; напряжение на поверхности вызывает скопление парафина под сферой.

Керр показал в 1875 году, что многие вещества приобретают двойное преломление при электрическом напряжении; его полное определение законов этого действия было опубликовано позже.

Что касается прямых измерений электрических волн, то их не было; величина скорости, с которой, если теория Максвелла верна, они должны распространяться, была определена на основе электрических наблюдений совершенно иного характера. Вебер и Кольрауш измерили значение K для воздуха, для которого μ равно единице, и из их наблюдений следует, что значение волновой скорости для электромагнитных волн составляет около 31×10^9 сантиметров в секунду. Из экспериментов Физо и Фуко было известно, что скорость света имеет примерно такое значение, и именно близкое совпадение этих двух значений побудило Максвелла написать в 1864 году:

“Совпадение результатов, по-видимому, показывает, что свет и магнетизм являются воздействиями одного и того же вещества, и что свет представляет собой электромагнитное возмущение, распространяющееся в поле в соответствии с электромагнитными законами”.

Ко времени выхода первого издания “Электричества и магнетизма” Максвелл и Томсон (лорд Кельвин) оба определили K и показали, что по крайней мере для воздуха результирующее значение скорости электромагнитных волн очень близко к значению скорости света.

В отношении других веществ на ту дату наблюдений было еще меньше. Гибсон и Барклай определили удельную индуктивную способность парафина и обнаружили, что его квадратный корень равен $1 \cdot 405$, в то время как его показатель преломления для длинных волн равен $1 \cdot 422$. Сам Максвелл считал, что если бы можно было доказать, что подобное согласие справедливо для ряда веществ, мы могли бы с уверенностью заключить, что “квадратный корень из K , хотя он и не может быть полным выражением показателя преломления, является, по крайней мере, наиболее важным членом в нем”.

С тех пор и до смерти Максвелла было сделано достаточно, чтобы с лихвой оправдать это утверждение. Из наблюдений Больцмана, Силоу, Хопкинсона и других стало ясно, что существует множество веществ, для которых квадратный корень из удельной индуктивной способности действительно почти равен показателю преломления, и были приведены веские основания, почему в некоторых случаях между ними должна быть значительная разница.

Хопкинсон обнаружил, что в случае со стеклом различия были очень большими, и впоследствии было установлено, что они значительны для большинства исследованных твердых веществ, за исключением парафина и серы. Для нефтяного масла, бензина, толуола, бисульфида углерода и некоторых других жидкостей соответствие между теорией Максвелла и экспериментом является близким. Для жирных масел, таких как касторовое масло, оливковое масло, масло спермы, масло для ног, а также для эфира, различия значительны.

Представляется вероятным, что причина этого различия заключается в том факте, что в световых волнах мы имеем дело со скоростью волны возмущения чрезвычайно короткого периода. Теперь мы знаем, что упомянутые вещества проявляют оптическую дисперсию, и в настоящее время у нас нет полностью удовлетворительной теории, из которой мы могли бы рассчитать на основе экспериментов на очень коротких волнах, какой будет скорость для очень длинных волн. В большинстве случаев для получения приведенных чисел использовалась формула Коши. Однако величина K , обнаруженная экспериментально, соответствует этим бесконечно длинным волнам, и, цитируя слова профессора Дж. Дж. Томсона, “чудо не в том, что

не должно быть веществ, для которых соотношение $K = \mu^2$ не выполняется, а в том, что должно быть какое-либо вещество, для которого оно выполняется”.⁶⁶

Более того, как самим профессором Дж. Дж. Томсоном, так и Блондло было показано, что когда значение K измеряется при очень быстро меняющейся электризации, изменяющейся со скоростью около 25 000 000 в секунду, величина индуктивной способности стекла уменьшается примерно с 6·8 или 7 до примерно 2·7; квадратный корень из этого равен 1·6, что не сильно отличается от его показателя преломления. Значения индуктивной способности парафина и серы, которые, как следует помнить, вполне согласуются с теорией Максвелла, оказались не сильно различающимися в постоянном и быстро меняющемся поле.

С другой стороны, некоторые эксперименты Аронса и Рубенса в быстро меняющихся областях приводят к значениям, которые не сильно отличаются от значений, полученных другими методами. Однако теория этих экспериментов, по-видимому, открыта для критики.

Попытаться дать что-либо похожее на полный отчет о современных проверках взглядов Максвелла и современных разработках его теории - задача, выходящая за рамки наших возможностей, но отчет о Максвелле, написанный в 1895 году, был бы неполным без ссылки на работы Генриха Герца.

Максвелл рассказал нам, какими должны быть свойства электромагнитных волн в воздухе. Герц⁶⁷ в 1887 году позволил нам измерить эти свойства, и измерения полностью подтвердили взгляды Максвелла.

Метод создания электрических колебаний в проводнике был известен давно. На это указывали и Томсон, и фон Гельмгольц. Шиллер исследовал такие колебания в 1874 году и с их помощью определил индуктивную способность стекла, используя колебания, период которых варьировался от $\cdot 000056$ до $\cdot 00012$ секунды.

Эти колебания были вызваны разрядом конденсатора через катушку проволоки, обладающую самоиндукцией. Если электрическое сопротивление катушки не слишком велико, заряд колеблется взад-вперед между пластинами конденсатора до тех пор, пока его энергия не будет рассеяна в виде тепла, выделяемого проводом, и в электромагнитных излучениях, которые его покидают.

Период этих колебаний при надлежащих условиях определяется формулой $T = 2\pi\sqrt{CL}$, где L - коэффициент самоиндукции, а C - емкость конденсатора. Эти величины могут быть рассчитаны, и, следовательно, известно время колебания. Из такого устройства волны излучаются в пространство. Если бы мы могли измерить каким-либо методом длину такой волны, мы могли бы определить ее скорость, разделив длину волны на период. Но ясно, что, поскольку скорость сравнима со скоростью света, длина волны будет огромной, если только период не будет очень коротким. Таким образом, волна, распространяющаяся со скоростью света, период которой составлял $\cdot 0001$ секунду, такая как волны, с которыми работал Шиллер, имела бы длину $\cdot 0001 \times 30\,000\,000\,000$ или 3 000 000 сантиметров и была бы совершенно неизмеримой. Прежде чем можно было проводить измерения электрических волн, было необходимо (1) создавать волны с достаточно быстрым периодом, (2) разработать средства для их обнаружения. Это то, что сделал Герц.

Длину волны электрических колебаний можно уменьшить, уменьшив либо электрическую емкость системы, либо коэффициент самоиндукции провода. Компания Hertz приняла оба этих способа. Его вибратор в некоторых из наиболее важных экспериментов состоял из двух квадратных латунных пластин со стороной 40 см. К каждому из них прикреплен кусок медной проволоки длиной около 30 см, и каждая проволока заканчивается маленьким тщательно отполированным латунным шариком. Пластины расположены таким образом, чтобы провода лежали на одной прямой линии, при этом латунные шарики разделены очень небольшим воздушным зазором. Затем две пластины заряжаются, одна положительно, другая отрицательно, до тех пор, пока сопротивление изоляции воздушного зазора не уменьшится и через него не пройдет разряд. В этих условиях разряд является колебательным. Он состоит не из одной искры, а из серии искр, которые проходят и возвращаются в противоположных направлениях до тех пор, пока энергия первоначального заряда не будет излучена в пространство или рассеяна в виде тепла; затем пластины перезаряжаются, и процесс повторяется. В экспериментах Герца генератор заряжался путем подключения к вторичным выводам индукционной катушки.

В 1883 году профессор Фитцджеральд обратил внимание на этот метод создания электрических волн в воздухе и назвал два метра минимальной длиной волны, которая может быть достигнута. В 1870 году герр фон Безольд действительно проводил наблюдения за распространением и отражением электрических колебаний, но его работа, опубликованная в качестве предварительного сообщения, привлекла мало внимания. Герц был первым, кто в 1887 году систематически предпринял исследование электрических волн в воздухе, исходящих от такого генератора, с целью проверки различных теорий электромагнитного воздействия.

Однако оставалось необходимым разработать устройство для обнаружения волн. Когда волны падают на проводник, в нем возникают электрические разряды, которые при надлежащих условиях могут наблюдаться в виде крошечных искр. Герц использовал в качестве своего детектора проволочную петлю, концы которой заканчивались двумя маленькими латунными шариками. Проволока была согнута так, что шарики располагались очень близко друг к другу, и было видно, как искры проходят через крошечный воздушный зазор, разделявший их. Такой провод будет иметь свой собственный определенный период колебаний электричества, которым он может быть заряжен, и если частота падающих на него электрических волн совпадает с частотой волн, которые он сам может излучать, колебания, возникающие в проводе, будут сильнее, чем при других условиях, видимые искры будут более яркими.⁶⁸ Резонатор Герца представлял собой проволочный круг радиусом тридцать пять сантиметров, период для такого резонатора, по его расчетам, был бы таким же, как у его вибратора.

Однако существует очень значительная трудность в определении периода электрического генератора по его размерам, и значение, полученное в результате расчетов для периода излучателя Герца, не очень достоверно. Полный период, однако, сравним с двумя сотыми миллионных долей секунды; в своих оригинальных работах Герц по ошибке дал значение, большее этого.

С помощью этих устройств Герц смог обнаружить присутствие электрического излучения на значительных расстояниях от излучателя; он также смог измерить длину его волны. В случае звуковых волн хорошо известно существование узлов и петель, образующихся при соответствующих условиях. Когда волны непосредственно отражаются от плоской поверхности,

происходит интерференция между падающей и отраженной волнами, устанавливаются стационарные колебания, и формируются узлы и петли - места минимального и максимального движения соответственно. Положение этих узлов и петель может быть определено с помощью подходящего устройства, и может быть показано, что расстояние между двумя последовательными узлами составляет половину длины волны.

Аналогично, когда электрические колебания падают на отражатель, например, на большую плоскую поверхность металла, возникают стационарные колебания из-за интерференции между падающей и отраженной волнами, и они приводят к возникновению электрических узлов и петель. Положение таких узлов и петель может быть найдено с помощью прибора Герца или другими способами, и, следовательно, может быть найдена длина электрических волн. Существование узлов и петель показывает, что электрические эффекты распространяются за счет волнового движения. Длина волн оказывается определенной, поскольку узлы и петли повторяются через равные промежутки времени друг от друга.

Если предположить, что частота известна, то можно определить скорость распространения волн. Из своих экспериментов Герц обнаружил, что в воздухе волны распространяются со скоростью света. Однако, похоже, что в расчетах были допущены две ошибки, которые исправили друг друга, так что ни значение частоты, приведенное в статье Герца, ни наблюдаемая длина волны не являются правильными.

Модифицировав прибор, стало возможным измерить длину волны, передаваемой по медному проводу, и, следовательно, снова приняв период колебаний, рассчитать скорость распространения волны по проводу. Герц провел эксперимент и из своих первых наблюдений обнаружил, что волны распространяются вдоль проволоки с конечной скоростью, но что эта скорость отличается от скорости в воздухе. Длина полуволны в проводе составляла всего около 2,8 метров; в воздухе - около 4,5 метров.

Итак, этот эксперимент позволил провести решающую проверку теорий Максвелла и фон Гельмгольца. Согласно первому, волны вообще не распространяются по проводу; они распространяются по воздуху вдоль провода, и длина волны, наблюдаемая Герцем, должна была быть такой же, как в воздухе. Согласно фон Гельмгольцу, две скорости, наблюдаемые Герцем, должны были отличаться, как, собственно, и было, и эксперимент, по-видимому, доказал, что теории Максвелла недостаточно и что необходима более общая теория, такая как теория фон Гельмгольца. Но другие эксперименты не привели к такому же результату. Сам Герц, используя более быстрые колебания в некоторых более поздних измерениях, обнаружил, что длина электрических волн от данного генератора была одинаковой независимо от того, передавались ли они в свободном пространстве или проходили по проводу.⁶⁹ Лечер и Дж. Дж. Томсон пришли к тому же результату; но наиболее полными экспериментами на этот счет являются эксперименты Саразина и Де ла Рива.

Таким образом, можно считать установленным, что теории Максвелла достаточно и что в большей общности теории фон Гельмгольца нет необходимости.

В более поздней работе Герц показал, что электрические волны могут отражаться и преломляться, поляризовываться и анализироваться точно так же, как световые волны. Во введении к своему "Собранию сочинений" он пишет (стр. 19):

Бросая теперь взгляд назад, мы видим, что с помощью описанных выше экспериментов впервые доказано распространение во времени предполагаемого действия на расстоянии. Этот факт формирует философский результат экспериментов, и действительно, в определенном смысле, самый важный результат. Доказательство включает в себя признание того факта, что электрические силы могут отделяться от материальных тел и могут продолжать существовать в виде условий или изменений в состоянии пространства. Детали экспериментов далее доказывают, что конкретный способ распространения электрической силы демонстрирует ближайшую аналогию с распространением света; более того, он почти полностью соответствует ему. Гипотеза о том, что свет является электрическим явлением, таким образом, становится весьма вероятной. Чтобы дать строгое доказательство этой гипотезы, логически потребовались бы эксперименты с самим светом.

“То, что мы здесь указываем как достигнутое с помощью экспериментов, достигается независимо от правильности конкретных теорий. Тем не менее, существует очевидная связь между экспериментами и теорией, в связи с которой они действительно проводились. С 1861 года наука располагает теорией, которую Максвелл построил на основе взглядов Фарадея, и которую мы поэтому называем теорией Фарадея-Максвелла. Эта теория подтверждает возможность обнаруженного здесь класса явлений так же положительно, как остальные электрические теории вынуждены отрицать это. С самого начала теория Максвелла превосходила все остальные своей элегантностью и обилием связей между различными явлениями, которые она включала.

“Вероятность этой теории, а следовательно, и число ее приверженцев, увеличивались из года в год. Но до тех пор, пока теория Максвелла зависела исключительно от вероятности своих результатов, а не от достоверности своих гипотез, она не могла полностью вытеснить теории, которые ей противостояли.

“Фундаментальные гипотезы теории Максвелла противоречили обычным взглядам и не основывались на доказательствах решающих экспериментов. В этой связи мы можем наилучшим образом охарактеризовать объект и результат наших экспериментов, сказав: целью этих экспериментов была проверка фундаментальных гипотез теории Фарадея-Максвелла, а результатом экспериментов является подтверждение фундаментальных гипотез теории”.

После смерти Максвелла были написаны тома по вопросам электричества, вдохновленные его работами. Точка зрения, с которой рассматривается теория электричества, полностью изменилась. Величайшие мастера математической физики обнаружили в развитии взглядов Максвелла задачу, потребовавшую всех их сил, и собранный урожай новых истин оказался наиболее богатым. Но хотя это так, по-прежнему часто задают вопрос: что такое теория Максвелла? Сам Герц завершает только что упомянутое введение своим наиболее интересным ответом на этот вопрос. Проф. Больцман сделал теорию предметом важного курса лекций. Пуанкаре во введении к своим “Лекциям по теориям Максвелла и электромагнитной теории света” выражает трудности, которые многие испытывают в понимании того, что представляет собой эта теория. “Когда французский читатель впервые открывает книгу Максвелла, - говорит он, - к его восхищению примешивается чувство неловкости, часто даже недоверия. Только после длительного изучения и ценой многих усилий это чувство рассеивается. Некоторые великие умы сохраняют его навсегда”. И снова он пишет: “Французский ученый, один из тех, кто

наиболее полно постиг значение Максвелла, однажды сказал мне: "Я понимаю в книге все, кроме того, что подразумевается под телом, заряженным электричеством".

При рассмотрении этого вопроса наиболее важным является собственное замечание Пуанкаре: "Максвелл не дает механического объяснения электричества и магнетизма, он лишь стремится показать, что такое объяснение возможно".

Мы не можем найти в "Электричестве" ответа на вопрос — Что такое электрический заряд? Максвелл не претендовал на знание, и попытка придать слишком большую определенность его взглядам на этот счет может привести к неправильному представлению о том, что это были за взгляды.

Согласно старым теориям действия на расстоянии и притяжения электрических и магнитных жидкостей в соответствии с известными законами, быть механиком было легко. Необходимо было только исследовать, каким образом такие жидкости могут распределяться таким образом, чтобы находиться в равновесии, и рассчитать силы, возникающие в результате такого распределения. Проблему придания эфиру такой механической структуры, которая позволит ему оказывать действие, происходящее в электромагнитном поле, решить сложнее, и пока она не будет решена, вопрос — что такое электрический заряд? — должен оставаться без ответа. Тем не менее, для понимания теории Максвелла это знание не обязательно.

Свойства эфира в диэлектриках и в проводниках должны быть совершенно разными. В диэлектрике эфир обладает способностью накапливать энергию за счет некоторого изменения своей конфигурации или структуры; в проводнике эта способность отсутствует, вероятно, из-за действия вещества, из которого состоит проводник.

Когда говорят, что мы заряжаем изолированный проводник, мы на самом деле воздействуем на эфир по соседству с телом, чтобы накапливать в нем энергию; если в поле есть другой проводник, мы не можем накапливать энергию в эфире, который он содержит. Таким образом, когда мы переходим от внешней стороны этого проводника к его внутренней части, происходит внезапное изменение некоторой механической величины, связанной с эфиром, и это изменение проявляется как сила притяжения между двумя проводниками. Максвелл назвал изменение структуры или свойств, которое происходит, когда диэлектрик таким образом запасается электростатической энергией, *Электрическим смещением*; если мы обозначим это через D , то электрическая сила R равна $4\pi D / K$, и, следовательно, энергия в единице объема равна $2\pi D^2 / K$, где K - величина, зависящая от изолятора.

Итак, D , электрическое смещение, - это величина, которая имеет как направление, так и величину. Следовательно, его значение в любой точке может быть представлено обычной прямой линией; внутри проводника оно равно нулю. Полное изменение D , которое происходит по всей поверхности проводника, когда мы входим в него извне, измеряет, согласно Максвеллу, общий заряд на проводнике. В точках, в которых линии, представляющие D , входят в проводник, заряд отрицательный; в точках, в которых они покидают его, заряд положительный; вдоль линий смещения по всему эфиру существует напряжение, измеряемое $2\pi D^2 / K$; под прямым углом к этим линиям давление такой же величины.

В дополнение к вышесказанному компоненты смещения D должны удовлетворять определенным соотношениям, которые могут быть выражены только в математической форме, физический смысл которой трудно выразить нематематическим языком.

Когда эти соотношения выражены таким образом, проблема нахождения величины смещения во всех точках пространства становится определенной, и могут быть получены силы, действующие на проводники. Более того, можно рассчитать общее изменение смещения при входе в проводник или выходе из него, и это дает величину, известную как общий электрический заряд на проводнике. Силы, полученные вышеуказанным методом, в точности совпадают с теми, которые существовали бы, если бы мы предположили, что каждый проводник заряжен в обычном смысле с только что найденными величинами и притягивается или отталкивается в соответствии с обычными законами.

Если, таким образом, мы определяем электрическое смещение как изменение, которое происходит в диэлектрике, когда он становится источником электростатической энергии, и если, далее, мы предполагаем, что изменение, каким бы оно ни было механически, удовлетворяет определенным хорошо известным законам, и что, как следствие, в диэлектрике существуют определенные давления и напряжения, электростатические проблемы могут быть решены без учета электрического заряда, находящегося на проводниках.

Мне кажется, что нечто подобное - это теория электричества Максвелла применительно к электростатике. Чтобы понять это, необязательно знать, какое изменение в эфире представляет собой электрическое смещение или что такое электрический заряд, хотя, конечно, такое знание сделало бы наши взгляды более определенными и сделало бы теорию механической.

Когда мы обращаемся к магнетизму и электромагнетизму, теория Максвелла развивается сама собой. Эксперимент доказывает, что магнитная индукция связана со скоростью изменения электрического смещения, согласно уже приведенным законам. Если бы, таким образом, мы знали природу изменения, которому было дано название "электрическое смещение", то была бы известна природа магнитной индукции. Трудности на пути любого механического объяснения, это правда, очень велики; предполагая, однако, что возможна некоторая механическая концепция "электрического смещения", теория Максвелла дает последовательный отчет о других явлениях электромагнетизма.

Опять же, у нас, это правда, электромагнитная теория света, но мы не знаем природы изменения в эфире, которое воздействует на наши глаза с ощущением света. Это то же самое, что электрическое смещение, или магнитная индукция, или поскольку, когда электрическое смещение изменяется, магнитная индукция всегда сопровождает его, является ли ощущение света результатом совместного действия этих двух факторов?

Эти вопросы остаются без ответа. Возможно, что свет - это не электрическое смещение и не магнитная индукция, а какое-то совершенно иное периодическое изменение структуры эфира, которое распространяется в эфире с той же скоростью, что и эти величины, и подчиняется многим из тех же законов.

В этом отношении существует существенное различие между обычной теорией света и электромагнитной теорией. Первая представляет собой механическую теорию; она исходит из предположения, что периодическое изменение, составляющее свет, является обычным линейным смещением среды — эфира, - обладающей определенными механическими свойствами, и из этих свойств она с большим или меньшим успехом выводит законы оптики.

Лорд Кельвин в своем лабильном эфире изобрел среду, которая могла бы существовать и которая обладает необходимыми механическими свойствами. Периодические линейные

перемещения лабильного эфира подчинялись бы законам света, и, исходя из фундаментальных гипотез теории, большинству чисто оптических явлений может быть дано механическое объяснение, достаточно удовлетворительное по своим основным характеристикам. Отношения между светом и электричеством, или светом и магнетизмом, однако, не затрагиваются этой теорией; более того, их нельзя затронуть, не сделав некоторого предположения относительно того, что такое электрическое смещение.

В последние годы были высказаны различные предположения относительно природы изменения, которое представляет собой электрическое смещение. Одна теория, созданная фон Гельмгольцем, предполагает, что электрокинетический импульс, или векторный потенциал Максвелла, на самом деле является импульсом движущегося эфира; согласно другой, предложенной, первоначально в грубой форме Чаллисом и развитой в течение последних нескольких месяцев в очень удовлетворительных деталях Лармором, скорость эфира - это магнитная сила; были разработаны другие, но мы все еще ждем второго Ньютона, который дал бы нам теорию эфира, которая включала бы факты электричества и магнетизма, светового излучения и, возможно, гравитации.⁷¹

Между тем мы считаем, что Максвелл сделал первые шаги к этому открытию и указал направления, по которым будущий первооткрыватель должен направить свои поиски, и поэтому мы отводим ему ведущее место среди лидеров науки этого столетия.

СНОСКИ

1 Полный биографический отчет о семьях Клерк и Максвелл приведен в заметке мисс Изабеллы Клерк в “Жизни Джеймса Клерка Максвелла”, и из нее было взято приведенное выше краткое изложение.

2 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 26.

3 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 27.

4 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 49.

5 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 52.

6 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 56.

7 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 67.

8 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 75.

9 Профессор Гарнетт в журнале Nature, 13 ноября 1879г.

10 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 105.

11 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 116.

12 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 123-129.

13 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 190.

14 Настоятель Кентерберийского.

15 Мастер Троицы.

16 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 174.

17 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 195.

18 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 207.

19 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 208.

20 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 210.

21 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 211.

22 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 216.

23 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 256.

24 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 267.

25 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 269.

26 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 278.

27 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 292.

28 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 303.

29 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 259.

Отчет 30 бакалавриата, ньюкасл, 1863г.

31 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 340.

32 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 332.

33 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 336.

34 Профессорами, с которыми консультировались, были Чаллис, Уиллис, Стоукс, Кейли, Адамс и Ливинг.

35 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 349.

36 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 381.

37 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 379.

38 Отчет о лаборатории приведен в Nature, том x, стр. 139.

39 Канцлер до конца своей жизни продолжал проявлять горячий интерес к работе в лаборатории. В 1887 году, в Юбилейный год, в качестве проктора — в то же время я занимал должность Демонстратора — моей обязанностью было сопровождать канцлера и других должностных лиц в Виндзор, чтобы вручить обращение Университета Ее Величеству. Я был

представлен ректору в Паддингтоне, и он сразу же начал подробно расспрашивать меня о прогрессе лаборатории, количестве студентов и проводимой там работе, показав, что полностью знаком с последними достижениями.

40 В 1894 году список содержал в Части II шестнадцать имен, а в части I - сто три имени.

41 Согласно новым правилам, физика была исключена из первой части Tripos и образовала вместе с более продвинутыми разделами астрономии и чистой математики отдельную часть, в которую допускались только ученые. Таким образом, число мужчин, которых поощряли к чтению физики, было очень ограниченным. Эта пагубная система была изменена в действующих в настоящее время правилах, которые вступили в действие в 1892 году. Часть I. математического пособия Tripos теперь содержит тепло, элементарную гидродинамику и звук, а также более простые части электричества и магнетизма, и кандидаты на этот экзамен действительно приходят в лабораторию, хотя и не в очень большом количестве. Более продвинутые разделы математики и физики включены в Часть II.

42 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 383.

43 “Statique Expérimentale et Théorique des Liquides soumis aux seules Forces Moléculaires.” Par J. Plateau, Professeur à l’Université de Gaud.

44 “Красные львы” - это клуб, созданный членами британской ассоциации для встреч, чтобы расслабиться после тяжелых трудовых будней.

45 “Leonum arida nutrix.”—Horace.

46 в.р., бесконечный.

47 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 394.

48 “Жизнь Дж. К. Максвелла”, стр. 404.

49 В своей “Гидродинамике”, опубликованной в 1738 году, Даниэль Бернулли обсудил строение газа и из общих соображений доказал, что давление, если оно возникает в результате столкновения нескольких движущихся частиц, должно быть пропорционально квадрату их скорости. (См. “Pogg. Ann.”, Bd. 107, 1859, стр. 490.)

50 Доказательство заключается в следующем:—

Если σ - удельная теплоемкость при постоянном объеме, σ' - при постоянном давлении, и рассмотрим единицу массы газа при давлении p и объеме v , пусть объем увеличится на величину dv , а температура dy .

Таким образом, $\sigma'Dt = \sigma dT + p dv$

Но $p v = \frac{2}{3} T/m$

Следовательно, p является постоянным,

$p dv = \frac{2}{3} dT/m$

Следовательно, $\sigma' = \sigma + \frac{2}{3} 1/m$

Теперь предположим, что одной молекуле отдается определенное количество тепла, dH , и что ее температура равна T . Ее удельная теплоемкость равна σ , и

$$dH = \sigma m dT$$

$$\text{Но } dH = \beta dT$$

$$\text{Следовательно, } \beta = \sigma m$$

$$\text{Следовательно, } 1/m = \sigma/\beta$$

$$\text{Таким образом, } \sigma' = \sigma(1 + 2/(3\beta))$$

$$\text{И } \sigma'/\sigma = \gamma$$

$$\text{Следовательно, } \gamma = 1 + 2/(3\beta)$$

$$\text{Или } \beta = 2/(3(\gamma-1))$$

51 Из-за ошибки расчета фактическое значение коэффициента вязкости, полученное Максвеллом на основе этих наблюдений, слишком велико. Более поздние наблюдатели обнаружили более низкие значения, чем те, которые были приведены им; таким образом, объясняется разница.

52 Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten Sitz d. k. Akad Wien, Band LVIII., 1868.

53 Другое предположение, которое можно было бы сделать и которое необходимо для объяснения различных действий, наблюдаемых в сложном газе под действием электрического поля, состоит в том, что части, из которых состоит молекула, постоянно меняются. Таким образом, молекула пара состоит из двух частей водорода, одной из которых является кислород, но данная молекула кислорода не всегда соединяется с одними и теми же двумя молекулами водорода; частицы постоянно меняются. В работе Максвелла гипотеза такого рода не рассматривается.

54 Природа, том 1., стр. 152 (13 декабря 1894 г.).

55 См. Статьи мистера Кэпстика, филолог. Пер., тома. 185–186.

56 Природа, том х.

57 Исторический отчет о развитии науки об электричестве можно найти в статье профессора Кристал “Электричество” в “Британской энциклопедии”, девятое издание.

58 Томсон (лорд Кельвин), “Статьи по электростатике и магнетизму”, стр. 15.

59 Дж. Дж. Томсон, Б.А., Отчет, 1885, стр. 109, 113, Отчет по электрическим теориям.

60 Статей по “Электростатике” и др., стр. 26.

61 Трудно объяснить без анализа, что именно измеряется векторным потенциалом Максвелла. Скорость его изменения в любой точке пространства измеряет электродвижущую силу в этой точке, поскольку она обусловлена изменениями электрического тока в соседних проводниках; магнитная индукция зависит от первых дифференциальных коэффициентов компонентов

электротонического состояния; электрический ток связан с их вторыми дифференциальными коэффициентами таким же образом, как плотность притягивающего вещества связана с создаваемым им потенциалом. На языке, который сейчас часто используется в математической физике, электродвижущая сила в точке, обусловленная магнитной индукцией, пропорциональна скорости изменения Векторного потенциала, магнитная индукция зависит от “завитка” Векторного потенциала, в то время как электрический ток измеряется “концентрацией” Векторного потенциала. Исходя из знания Векторного потенциала, эти другие величины могут быть получены с помощью процессов дифференцирования.

62 Число 4π введено из-за системы единиц, обычно используемой для измерения электрических величин. Если бы мы приняли “рациональные единицы” мистера Оливера Хевисайда, это исчезло бы, как это происходит в (В).

63 Для точного утверждения относительно связи между направлениями линий электрического смещения и магнитной силы необходимо обратиться к статье профессора Пойнтинга, Phil. Пер., 1885, Часть II., стр. 280, 281. Идеи получили дальнейшее развитие в серии статей в “Электрике”, сентябрь 1895 г. Следует также сослаться на книгу Дж. Дж. Томсона “Недавние исследования в области электричества и магнетизма”.

64 Предисловие к “Принципам” Ньютона, 2-е издание.

65 “Lezioni Accademiche” (Firenze, 1715), p. 25.

66 В его предложении μ означает показатель преломления.

67 Статьи Герца были переведены на английский язык Д. Э. Джонсом и опубликованы под названием “*Электрические волны*”.

68 Некоторые последствия этого электрического резонанса были очень поразительно показаны профессором Оливером лоджем. *Смотри* на природу, 20 февраля 1890 года.

69 На первоначальные результаты Герца, без сомнения, повлияли волны, отраженные от стен и пола комнаты, в которой он работал. Кроме того, железная плита, находившаяся рядом с его аппаратом, возможно, оказала тревожащее влияние; но, несмотря на все это, именно его гению и его блестящим достижениям мы обязаны полным утверждением теории Максвелла.

70 Аналогия заключается не только в совпадении более или менее точно измеренных скоростей. Приблизительно равная скорость - это только один элемент среди многих других.

71 Для весьма наглядного изложения некоторых возможных теорий следует обратиться к президентскому обращению профессора У. М. Хикса к Секции А Британской ассоциации в Ипсвиче в 1895 году.

Примечание переписчика

Пунктуация, переносы и орфография были приведены в соответствие, когда в оригинальной книге было обнаружено преобладающее предпочтение; в остальном они не изменялись.

Исправлены простые типографские ошибки; непарные кавычки были исправлены, когда изменение было очевидным, и в остальном оставлены непарными.

Иллюстрации в этой электронной книге размещены между абзацами и вне цитат. В версиях этой книги, поддерживающих гиперссылки, ссылки на страницы в Списке иллюстраций ведут на соответствующие иллюстрации.

Сноски, первоначально располагавшиеся в конце страниц, были собраны, перенумерованы и размещены непосредственно перед Указателем.

Указатель не был проверен на правильность расположения в алфавитном порядке или ссылок на страницы.

Сегодня известно, что некоторые значения в оригинальной книге неверны, но здесь они не были изменены.

Страница 133: Последнее уравнение на странице,

$$\mu = \mu_0 (1 + .00275 t - .00000034 t^2)$$

было напечатано с ошибкой как

$$\mu = \mu_0 \{1 + .00275 t .00000034 t^2\}.$$

Это показано здесь с исправлениями, основанными на цитируемом источнике:

<https://archive.org/details/s05philosophicalmag21londuoft/page/212>

Страница 144: “возможно, связанных с ними атомов эфира” было напечатано именно так, но “эфир” может быть опечаткой для “другого”.

Страница 170: “следовательно, в точке С, где они соприкасаются” было напечатано как “А”, но рисунок 1 в этом месте помечен как “С”.